

# Entorno

INVESTIGACIÓN  
BTEX EN AGUA:  
AVANCES Y  
PERSPECTIVAS  
PARA SU  
TRATAMIENTO

REVISTA DE CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN

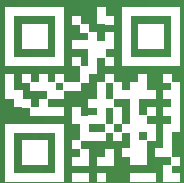
UDLAP



# FÁRMACOS

CONTAMINANTES EN RÍOS DEL MUNDO

[udlap.mx](http://udlap.mx)



ISSN 2594-0147

#9

Indizada en Latindex

DISTRIBUCIÓN GRATUITA SEP-DIC 2019

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

# UDLAP<sup>®</sup>

## JENKINS GRADUATE SCHOOL

# Maestrías

- **Administración de Empresas (MBA)**

RVOE: 20160808

- **Especialidad en Finanzas**

RVOE: 20160810

- **Especialidad en Mercadotecnia**

RVOE: 20160809

- **Gobernanza Global**

RVOE: 20170003

- **Finanzas**

RVOE: 20170311

- **Gestión y Liderazgo de Instituciones Educativas**

RVOE: 20170847

- **Defensa Fiscal**

RVOE: 20171134

- **Impuestos**

RVOE: 20171135



CDMX

PROGRAMAS DE **EDUCACIÓN CONTINUA**

***www.udlapjenkins.mx***

✉ [informes@udlapjenkins.mx](mailto:informes@udlapjenkins.mx)

☎ Tel.: (55) 47 47 62 89

📞 (+521) 222 577 38 29

📘 /udlapjenkinsg

🐦 @udlapjenkinsg

📍 UDLAP Jenkins Graduate School

**Av. Paseo de la Reforma 180 · Piso 16 Col. Juárez, CDMX.**

#### 4. ACCESO AL DERECHO

a la seguridad social en México

► Access to the Right to Social Security in Mexico

Por: Ixchel Beristáin Mendoza

#### 18. ÍNDICE DE ESCASEZ:

¿Un indicador de disponibilidad o una herramienta para la gestión del agua?

► Scarcity index: A water availability indicator or a tool for water management?

Por: Paul Hernández-Romero · Carlos Patiño-Gómez · Benito Corona Vásquez · Polioptro F. Martínez Austria

4.▼



## 24. OCURRENCIA DE FÁRMACOS ANTIINFLAMATORIOS COMO CONTAMINANTES EMERGENTES

en los ríos del mundo:  
una revisión sistemática

► Occurrence of anti-inflammatory drugs as emerging pollutants in the rivers of the world: a systematic review

Por: Rosa Edith Grijalva-Guiza · Mildred María López-Vázquez · Mónica Cerro-López · Maria Luisa Toledo-Wall · Lucila Isabel Castro-Pastrana

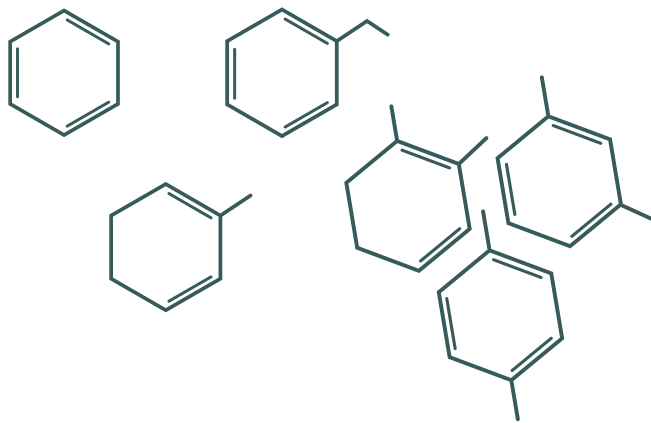


▲ 24. PORTADA

### 36. BTEX EN AGUA: avances y perspectivas para su tratamiento

► BTEX in water: advances and perspectives for its treatment

Por: Ana Karen Cordova Estrada · René Alejandro Lara Díaz · Felipe Cordova Lozano



### 52. MODELADO DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS CAPACITIVOS CMUT para ablaciones térmicas con fines médicos

► Modeling of CMUT capacitive ultrasonic transducers for thermal ablation for medical purposes

Por: Brian Michael Bouchan Durán · Manuel Bandala Sánchez · Gibran Etcheverry

# Entorno UDLAP

REVISTA DE CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN

#### PRESIDENCIA

José Ramón Valdés Parra

#### EDITOR GENERAL

Polioproto Fortunato Martínez Austria

#### CONSEJO EDITORIAL

##### Dirección Ejecutiva

Sergio Picazo Vela  
Decano de Investigación  
y Posgrado

##### Secretaría Ejecutiva

Lorena Martínez Gómez  
Directora general de Planeación  
y Evaluación

##### Coordinación

Editorial  
Izraim Marrufo Fernández  
Director de Comunicación

##### Editora Gráfica

Sonia Gisella  
Aguirre Narváez  
Profesora de la Licenciatura de  
Diseño de Información Visual

##### Tecnologías de la Información

Fernando Thompson  
de la Rosa  
Director general de Tecnologías  
de la Información

##### Biblioteca

María Elvia Catalina  
Morales Juárez  
Directora de  
Bibliotecas

##### DISEÑO EDITORIAL

Andrea M. Flores Santaella

##### CORRECCIÓN DE ESTILO

Aldo Chiquini Zamora  
Andrea Garza Carbajal

##### FOTOGRAFÍAS

Eric Jesús Hernández Cobix  
José Gerardo Alonso Moncada  
www.shutterstock.com

#### COMITÉ EDITORIAL

##### EDITORES ASOCIADOS

Artes y Humanidades  
Enrique Ajuria Ibarra

Ciencias

Miguel Ángel Méndez Rojas

Ciencias Sociales

Leandro Rodríguez Medina

Ingeniería e Innovación

Aurelio López Malo Vigil

Negocios y Economía

Raúl Bringas Nostti

##### MIEMBROS DEL

##### COMITÉ EDITORIAL

Ileana Azor Hernández

Universidad de las Américas Puebla

Antonio Alcalá González

Tecnológico de Monterrey

Cecilia Anaya Berríos

Universidad de las Américas Puebla

Jorge Gamaliel Arenas Basurto

Universidad de las Américas Puebla

Lucila Castro Pastrana

Universidad de las Américas Puebla

Miguel Doria

UNESCO

Jorge Alberto Durán Encalada

Universidad de las Américas Puebla

Alexander James Hope

Universidad Autónoma de Madrid

Juan Enrique Martínez-Legaz

Barcelona Graduate School of Economics

Raúl Mújica García

Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica

René Reyes Mazzoco

Universidad de las Américas Puebla

Ulises Sandal Ramos Koprivitz

Universidad de las Américas Puebla

Manuel Francisco Suárez Barraza

Universidad de las Américas Puebla

María Luisa Torregrosa y Armentia

Facultad Latinoamericana de  
Ciencias Sociales

# EDITORIAL

La constante búsqueda por la innovación dio origen a *Entorno UDLAP*, cuyo futuro es eminentemente digital y multimedia. El compartir la ciencia, conocimientos y experiencias en pleno siglo XXI no tiene fronteras; el acervo de todos los artículos publicados, al día de hoy, así como los que están por publicarse, están al alcance de la palma de la mano en un teléfono inteligente, tableta o computadora. Aún más, con certeza, en un futuro cercano también estarán disponibles en realidad aumentada, en tecnoprendas o *wearables* como anteojos y relojes.

Debemos dar por hecho que las ediciones impresas desaparecerán y conforme bajen de precio los e-readers como Kindle, así como la fusión que existirá entre las tabletas y los teléfonos celulares para dar pie a las phablets, será indispensable que todas las revistas, libros y periódicos sean digitales con contenidos enriquecidos por multimedia.

Edición tras edición de *Entorno UDLAP* hemos aumentado nuestro número de lectores y nos sentimos agradecidos. Los colaboradores que han contribuido son de una calidad que trasciende los límites de artículos puramente científicos, porque el lector se queda con conocimientos e ideas interesantes en la cabeza, de campos que no son su área, y en los que sí lo son, obtiene aportaciones muy valiosas. Las multidisciplinarias experiencias que comparten los autores contribuyen a que México siembre semillas que ayuden a los países de habla hispana a disponer de contenido gratuito de la más alta calidad, lo cual es invaluable.

Recuerdo a la perfección cuando nos embarcamos en este esfuerzo un grupo interdisciplinario de institutos de investigación, universidades públicas y privadas, abordando un tema clave para el crecimiento de cualquier país y especialmente de México: la difusión del conocimiento de tal forma que sea asimilado por un amplio espectro de lectores. Aquel ambicioso proyecto tomó forma gracias al liderazgo de la UDLAP e investigadores latinoamericanos comprometidos con la ciencia y la tecnología; donde, con más ingenio y empuje que recursos, dieron a luz todas estas ediciones.

La vinculación científica con la sociedad es una de las hélices requeridas para propulsar el progreso; lo que aquí se busca es ofrecer a los lectores ideas, propuestas y elementos que estimulen acciones más allá del conocimiento aislado. El internet, las redes sociales, las aplicaciones que dan vida a los teléfonos inteligentes, y tabletas, son precisamente parte del medio ambiente de *Entorno UDLAP* y en un futuro próximo con contenido multimedia que combine texto, video, imágenes y audio. Esto es lo que se merecen nuestros lectores, donde el espectro de edades tampoco debiera tener límites, lo mismo podrá ser un estudiante de nivel medio hasta los que hemos tenido la oportunidad de hacer posgrados, ya que toda aquella mente que esté sedienta de conocimiento podrá encontrar aquí temas relevantes sobre ingeniería, economía, cultura, negocios, artes, ciencias sociales y más.

**Mtro. Fernando Thompson de la Rosa**  
Director general de Tecnologías de la Información

ENTORNO UDLAP, Año 3, núm. 9, septiembre-diciembre 2019, es una publicación cuatrimestral editada por la Fundación Universidad de las Américas Puebla. Exhacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Tel.: (222) 229 20 00. [www.udlap.mx](http://www.udlap.mx), revista. [entornoudlap@udlap.mx](mailto:entornoudlap@udlap.mx)  
Editor responsable: Polioptro Fortunato Martínez Austria. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2018-070912041700-102, ISSN: 2594-0147, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Licitud de Título y Contenido núm. 16817, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa en los Talleres de la Universidad de las Américas Puebla, Exhacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Este número se terminó de imprimir el 27 de agosto de 2019, con un tiraje de 1000 ejemplares. Su distribución es gratuita.

Los artículos, así como su contenido, su estilo y las opiniones expresadas en ellos, son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la opinión de la UDLAP.

«Esta revista se publica bajo licencia de Creative Commons Atribución-No comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. CC BY-NC-SA 4.0» <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>



Los artículos publicados en Entorno UDLAP se someten a revisión por pares, en el sistema de «doble ciego», es decir que los árbitros no conocen el nombre de los autores del texto que revisan, ni los autores los nombres de quienes lo revisan. La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores, y no necesariamente refleja la postura de los editores, miembros del consejo y comité editoriales o de la Universidad de las Américas Puebla.

## SIMBOLOGÍA / SECCIÓN

 **AUTOR INTERNO**

 **AUTOR EXTERNO**

**UDLAP**<sup>®</sup>



► Access to the Right to Social Security in Mexico

# ACCESO AL DERECHO A LA **SEGURIDAD SOCIAL** en México

Por:  Ixchel Beristáin Mendoza



## RESUMEN

En este ensayo se hace una revisión del avance del Estado mexicano en garantizar el acceso al derecho a la seguridad social para su población. De este breve análisis se concluye que se han adoptado y creado los instrumentos legales y los mecanismos institucionales suficientes para dar cumplimiento a sus obligaciones de respetar y proteger ese derecho, sin embargo, sin duda éstos son sujetos de mejoras relevantes.

## ABSTRACT

This paper reviews the Mexican state's progress in guaranteeing access to the right to social security for its population. From this brief analysis, it is concluded that legal instruments and institutional mechanisms have been adopted and created enough to comply with their obligations to respect and protect this right; however, without doubt, these are subject to relevant improvements.

## PALABRAS CLAVE:

Seguridad social · Derechos humanos · Servicios de salud

## KEY WORDS:

Social security · Human Rights · Health services.

## INTRODUCCIÓN

El derecho a la seguridad social (DSS) es un derecho humano y su acceso en México tiene carácter constitucional, por lo que el Estado mexicano debe garantizarlo para toda su población, sin distingo alguno.

Ahora bien, los derechos humanos como meras declaraciones no son útiles para asegurar su disfrute. El Estado tiene la obligación de respetarlos, protegerlos, garantizarlos y promoverlos. Según explica Serrano (2013), la obligación de garantizar los derechos es la más compleja, puesto que implica, entre otras acciones:

- a. Adoptar medidas: crear y adecuar la infraestructura legal e institucional de la que depende la realización de los derechos.
- b. Proveer de bienes y servicios para satisfacer los derechos: el Estado debe dotar los

recursos materiales necesarios para que se logre disfrutar de los derechos.

La obligación de garantía se trata de asegurar la realización del derecho para todos en un contexto de recursos limitados, por lo que su efectividad puede conseguirse sólo de manera progresiva. Este principio de progresividad se complementa con la prohibición de regresividad, que indica que, una vez logrado el avance en el disfrute de los derechos, el Estado no podrá –salvo en ciertas circunstancias– disminuir el nivel alcanzado.

Nuestro objetivo es, con base en la revisión de documentos y estadísticas disponibles, evaluar someramente el avance del Estado mexicano en garantizar el DSS, ¿se ha creado una adecuada infraestructura legal e institucional para la realización de ese derecho?, ¿se proveen los bienes y servicios necesarios para su disfrute?

Después de esta introducción, en el primer apartado se aborda el compromiso del Estado mexicano por garantizar el DSS mediante la creación de la infraestructura legal e institucional relevante; en el segundo apartado, se exploran los esfuerzos del Estado para asegurar el disfrute del DSS, mediante la operación de las instituciones creadas al efecto, principalmente.

Queda de manifiesto un intrincado marco normativo e institucional que sustenta la convivencia simultánea de mecanismos propios de la seguridad social con los de protección social y con los de asistencia social, que son reflejo de la progresividad en el cumplimiento al DSS en México. Sin embargo, también se revela que este complicado entramado legislativo y organizacional no corresponde al de la intención de avanzar hacia un esquema de seguridad social universal e integral, sino más bien a gestionar y dar continuidad al arreglo tripartita «seguridad social–protección social–asistencia social».

Asimismo, se revela un complejo andamiaje organizacional que sustenta la garantía al DSS, en el que participan instituciones públicas de los tres niveles de gobierno, el sector privado e, inclusive, individuos. Se trata de una estructura fragmentada de subsistemas públicos de seguridad social, complementada con el accionar de programas públicos que encierran du-



**LA OBLIGACIÓN DE GARANTÍA SE TRATA DE ASEGURAR LA REALIZACIÓN DEL DERECHO PARA TODOS.**

plicidades y vacíos de cobertura, cuyo financiamiento es preocupante, frente a una operación costosa y de resultados cuestionables. Dichos esfuerzos no logran dar cobertura al total de la población, ni solucionan el problema de fondo y, en cambio, resultan útiles para conseguir réditos políticos.

Si bien es cierto que los sistemas de pensiones forman parte del acceso al DSS, por su complejidad, quedan fuera del alcance de este documento.

● **Compromiso del Estado mexicano por garantizar el derecho a la seguridad social**

Nuestra carta magna establece en su artículo 1° que todas las personas, sin distinción alguna, gozarán de los derechos humanos reconocidos en ella y en los tratados internacionales de los que el Estado mexicano sea parte.

Destaca el «Convenio Número 102 sobre la Seguridad Social» de la Organización Internacional de Trabajo (OIT) que establece las normas mínimas aceptadas a nivel mundial para nueve ramas de la seguridad social. En el caso de México, se han ratificado siete de las nueve ramas, según se muestra en el cuadro 1.

El artículo 123 constitucional sienta las bases de la seguridad social que da cobertura a «trabajadores, campesinos, no asalariados y otros sectores sociales y sus familiares». Consta de dos apartados, según sintetiza Sánchez-Castañeda (2012, p. 1):

- El apartado A, fracción XXIX, señala que es de utilidad pública la Ley del Seguro Social (LSS), encaminada a la protección y bienestar de los trabajadores, campesinos, no asalariados y otros sectores sociales y sus familiares.
- El apartado B, fracción XI, aborda la seguridad social de los trabajadores al servicio del Estado, y la fracción XIII establece las bases para la creación de la seguridad social de las fuerzas armadas mexicanas.

De acuerdo con Ruíz Moreno (2017, p. 152), con base en las leyes reglamentarias del artículo 123 constitucional, son creados los cuatro organismos públicos descentralizados que actualmente brindan el servicio público de seguridad social a los sujetos de aseguramiento,



## Derecho a la seguridad social



## En México el acceso es de carácter constitucional



## Mediante la creación de infraestructura: legal e institucional

así como a su grupo familiar derechohabiente dependiente económico:

1. Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), creado por la LSS.
2. Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), creado por la Ley del INFONAVIT.
3. Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores al Servicio del Estado (ISSSTE), creador por la Ley del ISSSTE.
4. Instituto de Seguridad Social para las Fuerzas Armadas (ISSFAM), creado por la Ley del ISSFAM.

En adición a lo anterior, en el artículo 123 constitucional, fracción XXXI, inciso a, numerales 8 y 9, relativos a hidrocarburos y petroquímica, y el inciso b numeral 1, relativo a las empresas que son administradas en forma directa o descentralizadas por el gobierno federal, encuentra sustento el Contrato Colectivo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), que otorga a los trabajadores de la paraestatal un «exclusivo» esquema de seguridad social, al que evidentemente acceden únicamente trabajadores petroleros y sus dependientes económicos directos (Penagos-Román, 1997, pp. 423-424).

Cabe destacar que los servidores públicos de las entidades federativas y los municipios se sujetan a la normatividad de su respectiva constitución local y legislación secundaria correspondiente, puesto que el apartado B sólo aplica a los trabajadores de los Poderes de la Unión y del Gobierno de la Ciudad de México. En consecuencia, hoy se tiene una legislación de seguridad social diferenciada no sólo entre los trabajadores de los Poderes de la Unión y los de las entidades federativas y sus municipios, sino también entre entidades federativas.

Resulta cuestionable contar con legislaciones diferenciadas para trabajadores privados y trabajadores al servicio del Estado y, al interior de estos últimos, legislaciones diferentes para trabajadores de los Poderes de la Unión y para trabajadores de gobiernos y organismos locales.

En este sentido, Sánchez-Castañeda (2012, pp. 96-101) señala que la misma Constitución establece que no se puede hacer distinción en-

**Cuadro 1. Ramas del convenio número 102 de la Organización Internacional del Trabajo ratificados por México.**

Ratificado	Rama	Concepto
✓	II	Asistencia médica
✓	III	Prestaciones de enfermedad
✓	VIII	Prestaciones de maternidad
✓	IX	Prestaciones de invalidez
✓	V	Prestaciones de vejez
✓	X	Prestaciones de sobrevivencia
✓	VI	Prestaciones en caso de accidentes del trabajo y de enfermedades profesionales
×	IV	Prestaciones de desempleo
×	VII	Prestaciones familiares

✓: Sí está ratificado por México.  
 ×: No está ratificado por México.  
 Fuente: elaboración propia con base en datos de la Organización Internacional del Trabajo, 2018.

tre los trabajadores, sin importar su condición. En consecuencia, la diferenciación entre trabajadores que sirven a empresarios y trabajadores que sirven al Estado no tiene razón de ser. El autor argumenta que la doctrina y la jurisprudencia de la Suprema Corte de Justicia de la Nación han reconocido que la relación entre el Estado y sus trabajadores es laboral y no de derecho administrativo, por lo que no hay cabida para un trato diferenciado entre trabajadores del sector privado y trabajadores al servicio del Estado. Asimismo, dice: «el trato diferenciado otorgado a los empleados públicos podría constituir un acto de discriminación, particularmente con relación al acceso a la seguridad social, los servicios y las prestaciones sociales y relacionadas con el empleo».

Por su parte, el artículo cuarto constitucional extiende el derecho a la alimentación, la salud y la vivienda a «toda persona», dando paso a diferentes mecanismos de protección y asistencia social que tienen como fin último garantizar tales derechos. Para la gestión de la protección y asistencia social, el Estado ha creado diferentes mecanismos:

1. Sistema Nacional de Desarrollo Social (SNDS), regulado por la Ley General de Desarrollo Social (LGDS) y coordinado por la Secretaría de Bienestar, otrora Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL).
2. Sistema Nacional de Salud (SNS), regulado por la Ley General de Salud (LGS), coordinado por la Secretaría de Salud (SALUD), y que incluye tanto instituciones federales como de gobiernos locales.

3. Sistema Nacional de Protección en Salud (SNPS), regulado por la LGS y coordinado por la Comisión Nacional de Protección Social en Salud (CNPSS).

4. Sistema Nacional de Asistencia Social (SINAS), regulado por la Ley de Asistencia Social (LAS) y coordinado por el Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia (SNDIF), que incluye los Sistemas Estatales y Municipales para el Desarrollo Integral de la Familia (SEDIF y SMDIF, respectivamente).

Así, el compromiso del Estado mexicano para garantizar el DSS tiene su reflejo en un intrincado marco normativo e institucional que sustenta la convivencia simultánea de mecanismos propios de la seguridad social con los de protección social y con los de asistencia social, según se muestra en la figura 1, y que son reflejo de la progresividad en el cumplimiento a este derecho.

En la praxis, el entramado institucional mexicano, para garantizar el acceso al DSS es complejo, y depende, prioritariamente, de la condición laboral de la persona (figura 2):

1. En primer término, quienes tienen una relación laboral dentro de la economía formal tienen acceso a las instituciones de seguridad social.
2. En segundo término, quienes no tienen acceso a ninguna de las instituciones arriba mencionadas, reciben cobertura por alguno de los sistemas dispuestos por el Estado para prestar servicios de protección social y asistencia social.



### • Esfuerzos del Estado mexicano para garantizar el derecho a la seguridad social

Como se ha expuesto, el Estado mexicano sólo prevé esquemas de seguridad social para los sujetos previstos en el artículo 123 Constitucional, y para el resto de la población ofrece dos principales mecanismos de atención:

1. Servicios de salud provistos por el SNS y el SPSS.
2. Programas de desarrollo social que atienden necesidades específicas de determinados segmentos de la población, en el marco del SNDS y del SINAS.

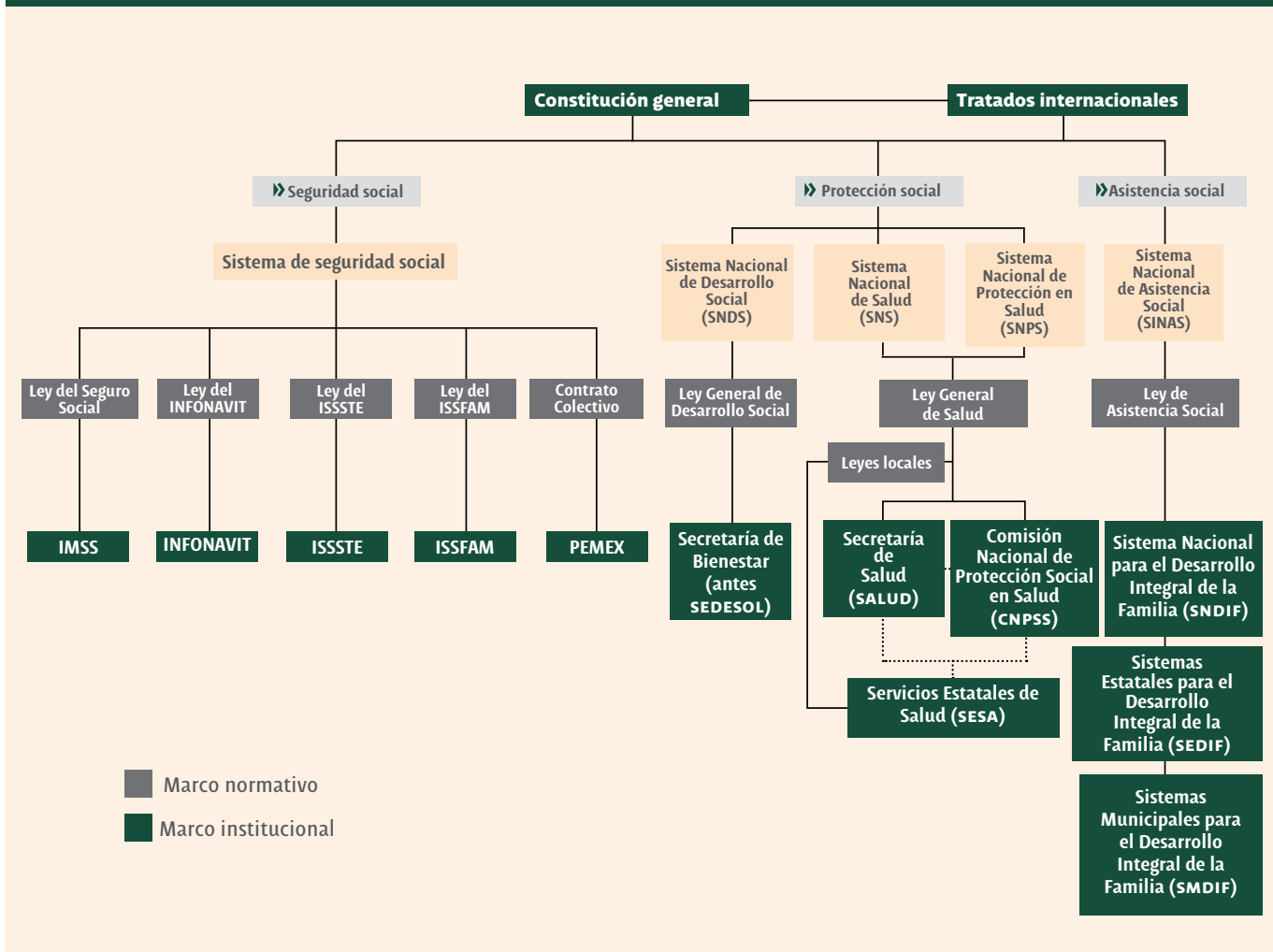
### • Servicios de salud

Gómez-Dantés *et al.* (2011), explican que en la prestación de servicios de salud en México participan los sectores público y privado (figura 3):

#### 1. El sector público comprende:

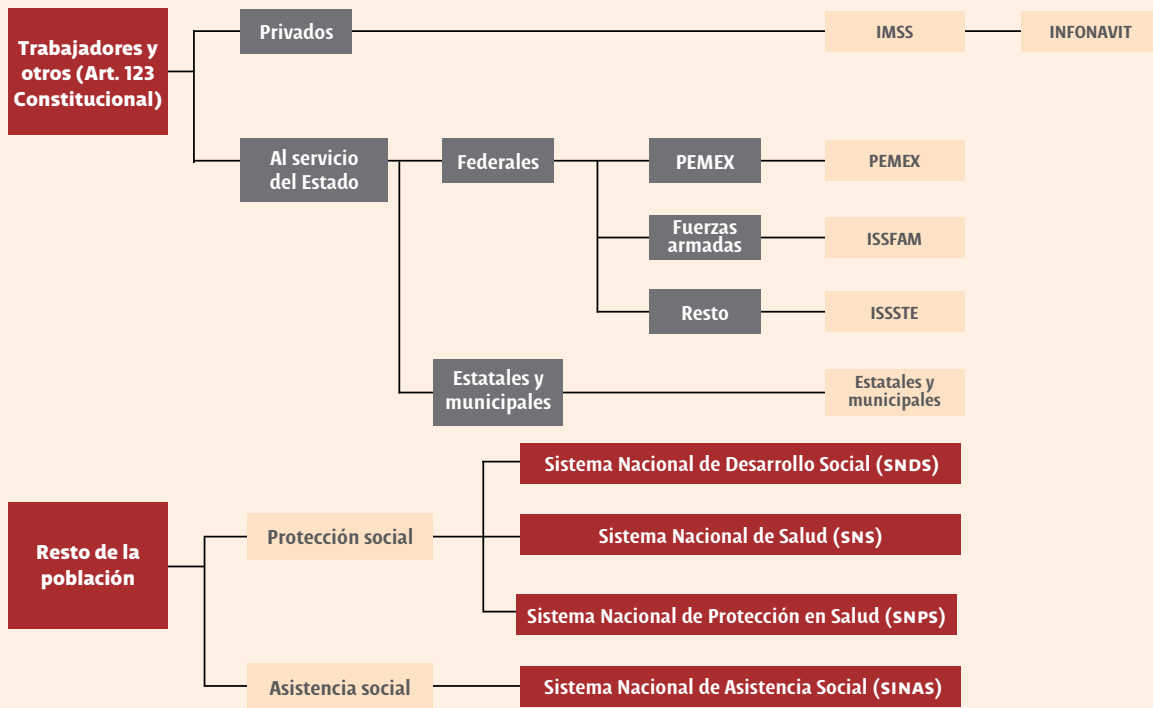
- a. Las instituciones de seguridad social (IMSS, ISSSTE, ISSFAM y PEMEX), que prestan servicios a los trabajadores con una relación de subordinación y estudiantes, principalmente.
- b. Las instituciones del SNS y del SPSS que prestan servicios a quienes se han afiliado a algún esquema voluntario en salud:

**Figura 1. Marco normativo e institucional para garantizar el derecho a la seguridad social en México.**



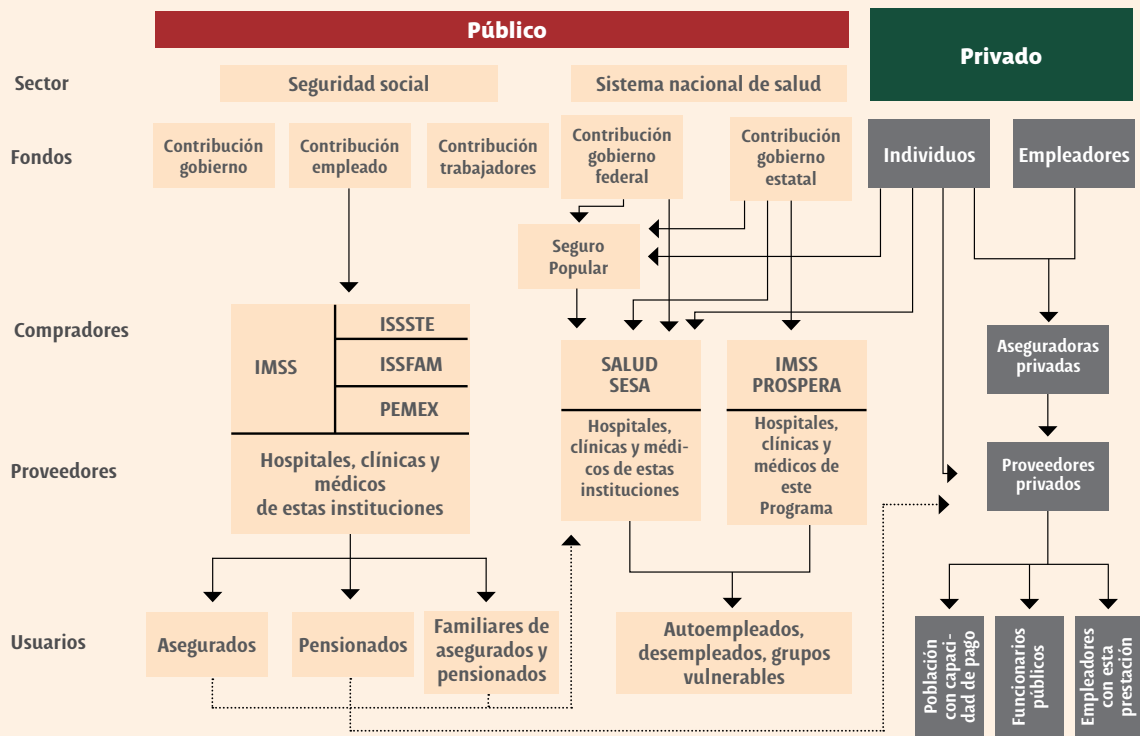
Nota: consúltense el significado de las siglas en el apartado de abreviaturas, acrónimos y siglas.

**Figura 2. Esquema general de acceso a seguridad social, protección social y asistencia social.**



Nota: consúltese el significado de las siglas en el apartado de abreviaturas, acrónimos y siglas.

**Figura 3. Estructura del sistema nacional de salud en México.**



Nota: consúltese el significado de las siglas en el apartado de abreviaturas, acrónimos y siglas.

Fuente: adaptado de Gómez Dantés et al. (2011).

- Seguro Popular de Salud (SPS), ofertado por el SPSS.

- Seguro de Salud para la Familia (SSFAM), provisto por el IMSS (régimen voluntario).

2. Las instituciones que protegen o prestan servicios a la población sin seguridad social, a través de las instituciones de la Secretaría de Salud, de los Servicios Estatales de Salud (SESA), y del Programa IMSS-Prospera, primordialmente.

3. El sector privado presta servicios a la población con capacidad de pago, y funcionarios públicos y empleados del sector privado que gocen de esta prestación. Comprende a las compañías aseguradoras y los prestadores de servicios que trabajan en consultorios, clínicas y hospitales privados, incluyendo a los prestadores de servicios de medicina alternativa.

Por lo que toca a los beneficiarios de las instituciones de salud, los autores distinguen tres grupos:

- Los asegurados (trabajadores asalariados y estudiantes, principalmente), los pensionados, y sus familias, que son beneficiarios de las instituciones de seguridad social.
- Los autoempleados, desempleados y personas que se encuentran fuera del mercado de trabajo formal, y sus familias, que recurren a los servicios provistos por las instituciones de la Secretaría de Salud, de los SESA y del Programa IMSS-PROSPERA.
- La población con capacidad de pago, y funcionarios públicos y empleados del sector privado con la prestación de servicios médicos privados, que hace uso de los servicios del sector privado, a través de pagos de bolsillo o planes privados de seguro, en su caso.

**Figura 4. La integración vertical del sistema nacional de salud en México.**

	Población asegurada				Población no asegurada		
	Seguros privados	Sistema de seguridad social			Con acceso a servicios públicos	Sin acceso	
Regulación (normalización, control de calidad)	Empresas comerciales	IMSS	ISSSTE	ISSFAM, PEMEX	Secretaría de Salud y SESA	IMSS-PROSPERA	Medicina tradicional
Financiamiento (aportaciones a seguros o pago por servicios)							
Prestaciones de servicios de salud							
Porcentaje de población (estimado 2015)					1%	39%	8%
	Mayor ingreso →				← Menor ingreso		

**Nota:** consúltense el significado de las siglas en el apartado de abreviaturas, acrónimos y siglas.

**Fuente:** adaptado de Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2005), actualizado con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017b).

En opinión de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), esta combinación de una serie de prestadores de servicios y aseguradores integrados de manera vertical para los trabajadores del sector formal, un sistema de hospitales públicos que atienden a quienes no están cubiertos por los «seguros sociales», y un extenso mercado privado de servicios de salud ha llevado a la fragmentación del sistema de salud (figura 4) (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2005).

Así, dice la OCDE, el sistema de salud en México tiene un carácter desarticulado, caracterizado por un conjunto de distintos subsistemas, cada uno de los cuales ofrece diferentes coberturas a grupos específicos, con costos disímiles y a precios diversos (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2016, p. 3).

Para ilustrar esta problemática señalada por la OCDE, considérense los siguientes ejemplos en materia de cobertura y de gasto en salud.

Si bien con el seguro popular más de cincuenta millones de mexicanos cuentan con un aseguramiento público que antes no tenían, y esto representa un avance importante en materia de cobertura, la afiliación a este régimen no garantiza el acceso efectivo a servicios de salud, brindados con calidad, eficiencia, pertinencia y oportunidad, ni asegura que los afiliados acudan a ejercer su derecho a la atención pública en salud, como bien señalan Martínez Soria y Murayama Rendón (2016, p. 29).

Por ejemplo, mientras el IMSS no tiene definidas intervenciones o un paquete de beneficios explícitos, el seguro popular cubre 284 intervenciones, con 1,585 diagnósticos, que representan sólo el 11% de los diagnósticos que cubre la seguridad social. Ello implica considerables desigualdades en el acceso a los servicios de salud en México (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2012, pp. 57-58).

Adicionalmente, quien pierde su empleo pierde los beneficios de la seguridad social, condicionada a su condición laboral. Las personas con empleo asalariado (y sus familias) tienen derecho a un paquete de beneficios y un conjunto de proveedores. Al perder su empleo,

muy probablemente tendrán que afiliarse al seguro popular, con un paquete de beneficios diferente y un conjunto de proveedores diferentes, en detrimento de su bienestar.

Por otro lado, se observan deficiencias en la cobertura a usuarios de los servicios de salud. Según se muestra en el cuadro 2, la afiliación al cierre de 2016 es de 153.07 millones de personas, cifra mayor que la del total de población para 2015, de 119.53 millones de habitantes, según la Encuesta Intercensal 2015, a cargo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

La discrepancia entre las cifras se puede explicar, primordialmente, por la múltiple afiliación de los asegurados y, en menor medida, por la estimación del IMSS de la población de derechohabiente potencial.

Aunado a lo anterior, la OCDE reporta: «según algunas encuestas, 18% de la población informa que no tiene seguridad social alguna, lo cual señala una falta de conocimiento que podría traducirse en un pobre acceso a atención médica, malos resultados y un riesgo financiero constante» (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2016, p. 19).

Sin duda, se requiere de un padrón único de beneficiarios de las instituciones que forman parte del SNS, así como del desarrollo del expediente electrónico único. Ambas herramientas deben ser gestionadas con base en las tecnologías de información adecuadas que permitan compartirlas entre instituciones y mantenerlas actualizadas.

Por su parte, el gasto de bolsillo en México representa el 48% del gasto total en salud, la segunda cifra más alta de la OCDE, después de los Estados Unidos de América, donde alcanza 51% (gráfica 1). De acuerdo con este organismo internacional, el gasto de bolsillo de las personas en atención de salud revela, en cierta medida, la limitada capacidad de respuesta del sistema para proporcionar una cobertura efectiva, servicios de alta calidad, o ambos. Asimismo, es otra fuente de desigualdad en el acceso a la atención de la salud, ya que se excluye a la población más pobre por falta de capacidad de pago (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2016, pp. 3, 21, 72).



**CON EL SEGURO POPULAR MÁS DE CINCUENTA MILLONES DE MEXICANOS CUENTAN CON UN ASEGURAMIENTO PÚBLICO QUE ANTES NO TENÍAN.**

Adicionalmente, mientras las instituciones de seguridad social se financian mediante un acuerdo tripartita de los empleadores, los trabajadores y el gobierno, los servicios de salud provistos para la población fuera del sector formal de la economía, los financia, en buena parte, sólo el gobierno federal. Esto ha generado un desequilibrio de recursos entre las instituciones públicas que conforman el SNS.

**Cuadro 2. Derechohabiencia de instituciones de seguridad social y del sistema nacional de salud en México, año más reciente disponible.**

Institución/ Esquema	Derechohabientes	
	Número	%
<b>Total</b>	<b>153,070,999</b>	<b>100.0</b>
<b>Seguros sociales</b>	<b>81,023,107</b>	<b>52.9</b>
IMSS <sup>1/</sup>	66,086,789	43.2
ISSSTE <sup>2/</sup>	13,113,158	8.6
ISSFAM <sup>3/</sup>	1,187,561	0.8
PEMEX <sup>4/</sup>	635,599	0.4
<b>Sistema nacional de salud</b>	<b>72,047,892</b>	<b>47.1</b>
Seguro Popular <sup>5/</sup>	54,923,952	35.9
SM Siglo XXI <sup>6/</sup>	5,207,192	3.4
IMSS-PROSPERA <sup>7/</sup>	10,367,215	6.8
<b>Otras instituciones<sup>8/</sup></b>	<b>1,549,533</b>	<b>1.0</b>
<b>Instituciones privadas<sup>8/</sup></b>	<b>3,268,807</b>	<b>2.1</b>

1/ Datos al cierre de 2017 (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2018).

2/ Datos al cierre de 2016 (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado, 2017).

3/ Datos al cierre de 2016 (Instituto de Seguridad Social para las Fuerzas Armadas Mexicanas, 2017).

4/ Datos al 1er trimestre de 2016 (Secretaría de la Función Pública, 2016, junio).

5/ Datos al cierre de 2016 (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud, 2017e).

6/ Datos al cierre de 2016 (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud, 2017d).

7/ Datos al cierre de 2016 (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social, 2017d).

8/ Datos para 2015 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017a).

## AÑO 2015

El gasto per cápita en salud de personas que NO cuentan con seguro social fue de **\$3,954.9**



A diferencia de **\$5,644.7** de quienes cuentan con seguridad social

**Esta desigualdad impacta en la capacidad de las instituciones para proporcionar una atención efectiva**

Datos disponibles para 2015 señalan que el gasto per cápita total de las personas que no cuentan con seguridad social fue de 3,954.9 pesos, en comparación con 5,644.7 de quienes cuentan con seguridad social (gráfica 2) (Secretaría de Salud, 2018). Esta desigualdad en el gasto impacta en la capacidad de las instituciones para proporcionar una atención más efectiva y, en consecuencia, en una desigual calidad en la atención y disponibilidad para la población.

Así, las diferencias institucionales dentro del Sistema Nacional de Salud se han traducido en inequidad en los servicios y en condiciones desiguales de salud en la población. Una prioridad debería ser alcanzar la equidad entre los paquetes de cobertura provistos por las Instituciones de seguridad social y los provistos por el Seguro Popular o el Seguro de Salud para la Familia, así como eliminar las diferencias en acceso y calidad de los servicios de salud que resultan de tener un sistema de salud fragmentado.

### • Programas de desarrollo social

En materia de seguridad social, hemos identificado nueve programas federales que guardan relación con la protección social y/o asistencia social que se brinda a la población que no tiene acceso a los «seguros sociales» (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2018):

1. Programa de pensión para adultos mayores (Programa PAM).
2. Programa de estancias infantiles para apoyar a madres trabajadoras (Programa PEI).
3. Programa de seguro de vida para jefas de familia (Programa SVJF).
4. Programa de empleo temporal (PET)
5. PROSPERA programa de inclusión social.
6. Programa IMSS-PROSPERA.
7. Programa de seguro médico siglo XXI.
8. Programa de apoyos para la protección de las personas en estado de necesidad.
9. Programa de atención a personas con discapacidad.

Como se muestra en el cuadro 3, en nuestra opinión, siete programas contribuyen a dar



**EL IMSS NO TIENE DEFINIDAS INTERVENCIONES O UN PAQUETE DE BENEFICIOS EXPLÍCITOS, EL SEGURO POPULAR CUBRE 284 INTERVENCIONES, CON 1,585 DIAGNÓSTICOS, QUE REPRESENTAN SÓLO EL 11% DE LOS DIAGNÓSTICOS QUE CUBRE LA SEGURIDAD SOCIAL.**



cobertura a cinco de las nueve ramas de la seguridad social; los restantes dos programas tal vez contribuyan con alguna rama, pero de manera indirecta.

Con base en la información de las fichas de monitoreo 2016-2017 para los programas federales de desarrollo social que el CONEVAL el-

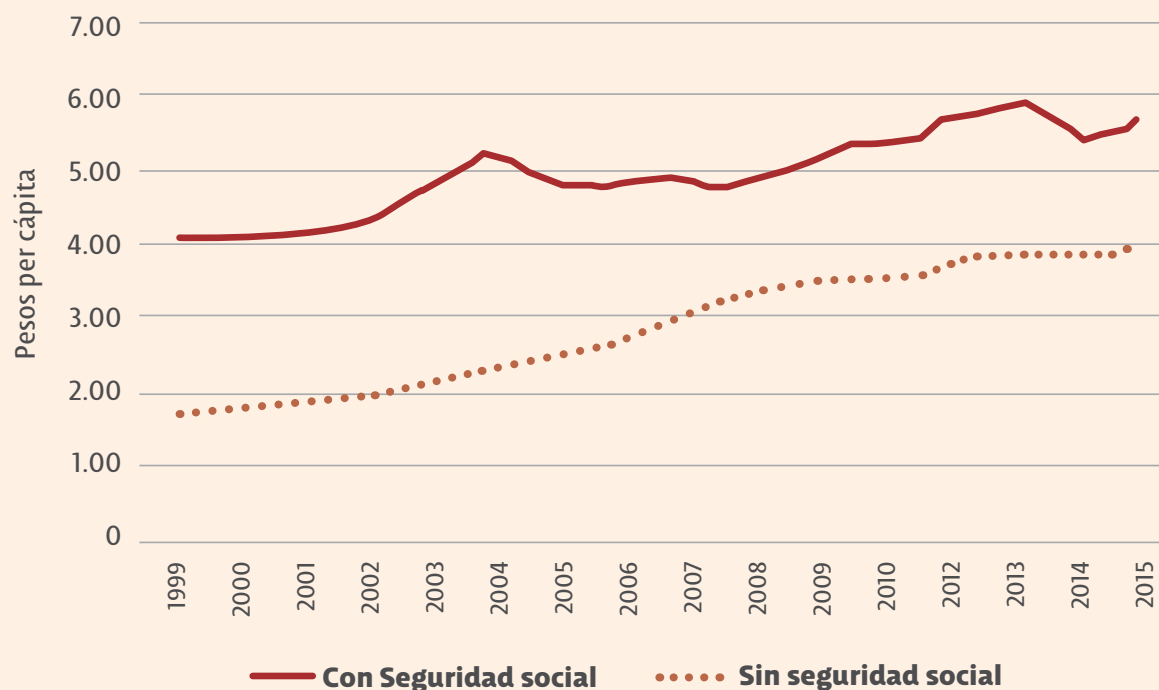
abora y publica, se tiene que los siete programas de interés, más el seguro popular, dan cobertura a 110.6 millones de beneficiarios, según se muestra en el cuadro 4. Una vez más, esta elevada cifra de cobertura resulta de los beneficiarios registrados en más de uno de los programas.

**Gráfica 1. Estructura porcentual del gasto total en salud en países de la OCDE, 2016.**



Fuente: Organization for Economic Co-operation and Development (2018).

**Gráfica 2. Gasto público en salud per cápita para población con y sin seguridad social (pesos de 2015).**



Fuente: Banco Mundial (2018) y Secretaría de Salud (2018).

**Cuadro 3. Contribución de los mecanismos dispuestos por el Estado mexicano para dar cumplimiento a las ramas de seguridad social.**

Ramas seguridad social	Sistema de seguridad social				Sistema Nacional de Salud Sistema Nacional de Desarrollo Social Sistema Nacional de Asistencia Social	
	IMSS	ISSSTE	ISSFAM	PEMEX		
Asistencia médica					Secretaría de Salud, SESA, Seguro Popular, Seguro Médico s XXI, PROSPERA, IMSS-PROSPERA	
Prestaciones de enfermedad						(X)
Prestaciones de maternidad						(X)
Prestaciones de invalidez					Programa de Atención a Personas con Discapacidad	
Prestaciones de vejez					Programa de Pensión para Adultos Mayores (PAM)	
Prestaciones de sobrevivencia					Programa de Seguro de Vida para Jefas de Familia	
Prestaciones en caso de accidentes del trabajo y de enfermedades profesionales						(X)
Prestaciones familiares	(Vivienda y guarderías)				Programa de Estancias Infantiles para Apoyar a Madres Trabajadoras	
Prestaciones de desempleo	(X)	(X)	(X)	(X)		(X)

(X): Sin cobertura.

**Cuadro 4. Beneficiarios de los programas de desarrollo social que contribuyen con algunas ramas de la seguridad social, 2016.**

Programa	Beneficiarios		
	Hombres	Mujeres	Total
Total	47,975,584	62,670,853	110,630,453
Seguro Popular	25,138,576	29,785,376	54,923,952
Seguro Médico sXXI	2,542,124	2,665,068	5,207,192
PROSPERA	13,012,897	14,880,341	27,893,238
IMSS-PROSPERA	5,055,662	5,311,553	10,367,215
Programa de Atención a Personas con Discapacidad	n.d.	n.d.	8,016
Programa Pensión para Adultos Mayores	2,193,431	3,260,344	5,453,775
Programa de Seguro de Vida para Jefas de Familia	0	6,464,735	6,464,735
Programa de Estancias Infantiles para Apoyar a Madres Trabajadoras	8,894	303,436	312,330

Fuente: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Programa IMSS-PROSPERA, 2017; Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e; Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e).

## CONCLUSIÓN

En nuestra percepción, el Estado mexicano ha adoptado y creado los instrumentos legales y los mecanismos institucionales suficientes para dar cumplimiento a sus obligaciones de respetar y proteger el derecho a la seguridad social (DSS), sin embargo, sin duda, éstos son sujetos de mejoras relevantes.

Un ejemplo es la falta de ratificación de las ramas de prestaciones de desempleo y de prestaciones familiares del Convenio Número 102 de la OIT: la seguridad social integral debiera contemplar un seguro de desempleo, acceso a vivienda digna y otras prestaciones para el bienestar de la familia.

Otro ejemplo es que el acceso a la seguridad social guarda relación directa con la condición laboral, favoreciendo principalmente a quienes cuentan con un trabajo en la economía formal. Esta distorsión es inaceptable en un país como México, en que casi el 60% del empleo corresponde al sector informal.

En este contexto, se ha diseñado, gestionado y mantenido un arreglo tripartita «seguridad social-protección social-asistencia social» que pretende garantizar el acceso al DSS a toda la población, pero que en su lugar ha generado, por un lado, un sistema nacional de salud fragmentado que entraña inequidades y deficiencias en la calidad, eficiencia, pertinencia y oportunidad de los servicios que presta; y por



## LAS DIFERENCIAS INSTITUCIONALES DENTRO DEL SISTEMA NACIONAL DE SALUD SE HAN TRADUCIDO EN INEQUIDAD EN LOS SERVICIOS Y EN CONDICIONES DESIGUALES DE SALUD EN LA POBLACIÓN.

otro lado, un «sistema» de programas de desarrollo que generan duplicidades y, a su vez, vacíos.

El Estado mexicano enfrenta retos importantes y complejos en materia de seguridad social. Por un lado, habrá que encausar esfuerzos para ampliar su cobertura, con miras a alcanzar la universalidad; y por otro lado, se requiere también avanzar en su integralidad. Es evidente que tales pretensiones podrán alcanzarse únicamente en el largo plazo, pero también es claro que si no se comienza a trabajar en sentar las bases para ello, cada vez estaremos más lejos de contar con un sistema de seguridad social adecuado.



## ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

<b>CNPSS</b>	Comisión Nacional de Protección Social en Salud
<b>CONEVAL</b>	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
<b>DSS</b>	Derecho a la seguridad social
<b>IMSS</b>	Instituto Mexicano del Seguro Social
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
<b>INFONAVIT</b>	Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores
<b>ISSFAM</b>	Instituto de Seguridad Social para las Fuerzas Armadas
<b>ISSSTE</b>	Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores al Servicio del Estado
<b>LAS</b>	Ley de Asistencia Social
<b>LSS</b>	Ley del Seguro Social
<b>LGDS</b>	Ley General de Desarrollo Social
<b>LGS</b>	Ley General de Salud
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<b>OIT</b>	Organización Internacional del Trabajo
<b>PAM</b>	Pensión para Adultos Mayores
<b>PEMEX</b>	Petróleos Mexicanos
<b>PET</b>	Programa de Empleo Temporal
<b>SALUD</b>	Secretaría de Salud
<b>SEDESOL</b>	Secretaría de Desarrollo Social
<b>SEDIF</b>	Sistemas Estatales para el Desarrollo Integral de la Familia
<b>SESA</b>	Servicios Estatales de Salud
<b>SINAS</b>	Sistema Nacional de Asistencia Social
<b>SMDIF</b>	Sistemas Municipales para el Desarrollo Integral de la Familia
<b>SNDIF</b>	Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia
<b>SNPS</b>	Sistema de Protección Social en Salud
<b>SNS</b>	Sistema Nacional de Salud
<b>SPSS</b>	Sistema de Protección Social en Salud
<b>SSFAM</b>	Seguro de Salud para la Familia
<b>SVJF</b>	Seguro de Vida para Jefas de Familia



### Ixchel Beristáin Mendoza

Licenciada en Economía, maestra en Administración de Empresas y maestra en Administración de Tecnologías de Información con especialidad en Sistemas de Información, por la UDLAP, y maestra en Economía Aplicada por la Universidad de Cardiff (Gran Bretaña). También es socia fundadora de Consultores Beristáin y de Velarca Consultores.  
[ixchel.beristainma@udlap.mx](mailto:ixchel.beristainma@udlap.mx)

### REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2018). Datos de libre acceso del Banco Mundial. Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2012). *Evaluación Estratégica de Protección Social en México*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL).
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Programa IMSS-PROSPERA. (2017). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Programa IMSS-PROSPERA*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_19\\_S038.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_19_S038.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social. (2017a). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Estancias infantiles para apoyar a madres trabajadoras*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_20\\_S174.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_20_S174.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social. (2017b). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Pensión para Adultos Mayores*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_20\\_S176.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_20_S176.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social. (2017c). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Programa de Empleo Temporal (PET)*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_20\\_S071.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_20_S071.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social. (2017d). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 PROSPERA Programa de Inclusión Social*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_20\\_S072.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_20_S072.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Desarrollo Social. (2017e). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Seguro de vida para jefas de familia*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de <https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/>

FMyE\_2016\_2017/FMyE\_20\_S241.pdf

- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud. (2017a). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Apoyo para la protección de las personas en estado de necesidad*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_12\\_S272.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_12_S272.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud. (2017b). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Programa de Atención a Personas con Discapacidad*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_12\\_S039.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_12_S039.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud. (2017c). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Programa de Desarrollo Comunitario «Comunidad Diferente»*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_12\\_S251.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_12_S251.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud. (2017d). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Seguro Médico Siglo XXI*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_12\\_S201.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_12_S201.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Secretaría de Salud. (2017e). *Ficha de Monitoreo 2016-2017 Seguro Popular*. México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Recuperado de [https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE\\_2016\\_2017/FMyE\\_12\\_U005.pdf](https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2016_2017/FMyE_12_U005.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2018). Inventario CONEVAL de Programas y Acciones Federales de Desarrollo Social. Recuperado de <https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/IPFE/Paginas/historico.aspx>
- Gómez-Dantés, O., Sesma, S., Becerril, V. M., Knaul, F. M., Arreola, H. y Frenk, J. (2011). Sistema de salud en México. *Salud Pública en México*, 52(2), 220-232. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0036-36342011000800017&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342011000800017&lng=es)
- Instituto de Seguridad Social para las Fuerzas Armadas Mexicanas. (2017). *Memoria anual 2016*. México: Instituto de Seguridad Social para las Fuerzas Armadas Mexicanas (ISSFAM). Recuperado de [http://www2.issfam.gob.mx/archivos/programas/memoria\\_2016.pdf](http://www2.issfam.gob.mx/archivos/programas/memoria_2016.pdf)
- Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado. (2017). Anuario Estadístico 2016. Recuperado de <https://www.gob.mx/issste/documentos/anuarios-estadisticos>
- Instituto Mexicano del Seguro Social. (2018). Consulta Dinámica (CUBOS).
- Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). Recuperado de <http://www.imss.gob.mx/conoce-al-imss/cubos>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017a). Encuesta Intercensal 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017b). Encuesta Intercensal 2015. Tabulados básicos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/default.html?init=1>
- Martínez-Soria, J. y Murayama-Rendón, C. (2016). El Sistema de Atención a la Salud en México. En C. Murayama-Rendón y S. M. Ruesga Benito (eds.), *Hacia un Sistema Nacional Público de Salud en México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) e Instituto Belisario Domínguez de la Cámara de Senadores.
- Organización Internacional del Trabajo. (2018). NORMLEX. Information System on International Labour Standards. NORMLEX, Organización Internacional del Trabajo. Recuperado de <http://www.ilo.org/dyn/normlex/es/f?p=1000:1>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2005). *Estudios de la OCDE sobre los Sistemas de Salud: México*. París: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2016). *Estudios de la OCDE sobre los Sistemas de Salud: México 2016*. París: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).
- Organization for Economic Co-operation and Development. (2018). «Health expenditure and financing: Health expenditure indicators». OCDE Health Statistics (database). Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1787/data-00349-en>
- Penagos-Román, M. (1997). Regulación del régimen laboral de Petróleos Mexicanos. En S. d. E. U. N. A. d. México (ed.), *Regulación del sector energético*, (pp. 417-447). México: Instituto de Investigaciones Jurídicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ruíz-Moreno, Á. G. (2017). *Nuevo derecho a la seguridad social*. México: Editorial Porrúa.
- Sánchez-Castañeda, A. (2012). *La seguridad y la protección social en México. Su necesaria reorganización*. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Secretaría de la Función Pública. (2016). *Confronta al primer trimestre 2016 de los padrones del Sistema Nacional de Salud. Resumen ejecutivo*. México: Secretaría de la Función Pública (SFP).
- Secretaría de Salud. (2018). Salud en números (DGIS). Secretaría de Salud. Recuperado de <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/menu-salud-en-numeros?state=published>
- Serrano, S. (2013). Obligaciones del Estado frente a los derechos humanos y sus principios rectores: una relación para la interpretación y aplicación de los derechos. En E. Ferrer Mac-Gregor Poisot, J. L. Caballero Ochoa y C. Steiner (eds.), *Derechos humanos en la Constitución: Comentarios de jurisprudencia constitucional e interamericana. Tomo I*, (pp. 89-132). México: Suprema Corte de Justicia de la Nación, Universidad Nacional Autónoma de México, Fundación Konrad Adenauer.

► Scarcity index: A water availability indicator or a tool for water management?

# ÍNDICE DE ESCASEZ: ¿Un indicador de disponibilidad o una herramienta para LA GESTIÓN DEL AGUA?

NOTA BREVE

Por:  Paul Hernández-Romero · Carlos Patiño-Gómez · Benito Corona Vásquez · Polioptro F. Martínez Austria

## ◆◆ INTRODUCCIÓN

La escasez de agua en una región o cuenca se presenta cuando los suministros de este recurso natural ya no son adecuados para cubrir los requerimientos de agua para diferentes usos, incluyendo el medio ambiente. Es decir, cuando la cantidad demandada de los cuerpos de agua (superficial y subterránea) es mayor en cierto porcentaje que el escurrimiento superficial y el volumen de agua en acuíferos. Así, el estrés hídrico se agrava en regiones donde hay una alta tasa de crecimiento poblacional y cambios continuos en los esquemas de consumo debido a la variabilidad climática. El recurso hídrico está cada vez más estresado con el aumento de la escasez en los diferentes nive-

les geográficos (regiones, países, estados y cuencas hidrológicas). El uso global de agua aumentó en una tasa aproximada de 20% por década entre 1960 y 2000, y de 10% entre el año 2000 y el 2010, con claras diferencias cuando se hace un análisis regional, de entre 15 y 32% (Vörösmarty, Lévêque y Revenga, 2005).

Dado que la disponibilidad de agua en cada región varía en espacio y tiempo, actualmente sólo el 25% de la población mundial está asentada en cuencas con «abundancia» relativa de agua, quedando el 75% restante con un estrés hídrico de moderado a grave. Para el 2050, se proyecta que la disponibilidad de agua per cápita se reduzca en promedio en un 50% con condiciones climáticas normales, sólo como resultado del incremento poblacional.





**◆ ANTECEDENTES**

Con base en lo anterior, uno de los criterios utilizados para establecer la disponibilidad de agua en un región o cuenca es conocer el grado de presión ejercido sobre el recurso hídrico o el índice de escasez hídrica (WSI, por sus siglas en inglés). De los índices basados en extracciones de agua, uno de los más utilizados es el WSI, propuesto inicialmente por Vörösmarty et al. (2005), al que también llamó índice de uso relativo local del agua. La clasificación de esta primera propuesta del WSI consideró el planteamiento realizado por la ONU en su documento «Evaluación integral de los recursos de agua dulce del mundo». Sin embargo, el WSI de Vörösmarty no conside-

raba los requerimientos ambientales de agua (EWR, por sus siglas en inglés) en su evaluación. Así, Smakhtin, Revenga y Döll (2004), con base en su trabajo previo sobre EWR, propuso agregar este componente a la ecuación del WSI. Generalmente, en los documentos de la CONAGUA (2018a) no se toman en cuenta los requerimientos ambientales de agua. En este trabajo se ha optado por considerar el WSI tomando en cuenta los EWR (Smakhtin, Revenga y Döll, 2004) y como un caso de estudio se ha aplicado en la cuenca del río Conchos en el norte de México, el cual se propone para que sea utilizado como una herramienta que aporte información a los tomadores de decisiones para gestionar de una manera más eficiente el recurso hídrico.

«

**LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS ES EL AFLUENTE MÁS IMPORTANTE DEL NORESTE DE MÉXICO.**

**Tabla 1. Clasificación del wsi.**

Grado	Valor
Extremadamente alto	WSI > 1.0
Muy alto	0.81 < WSI > 1.0
Alto	0.41 < WSI > 0.8
Medio	0.21 < WSI > 0.4
Bajo	0.11 < WSI > 0.2
Sin estrés	WSI < 0.1

● **Descripción del área de estudio**

La cuenca del río Conchos es el afluente más importante del noreste de México, el cual desemboca en el río Bravo que, en ese tramo, es la frontera entre Estados Unidos y nuestro país. Está ubicada casi totalmente dentro del estado de Chihuahua, tiene un área de drenaje de 66,682 km<sup>2</sup> y se estima que el cauce principal tiene una longitud de 750 km. Esta cuenca cuenta con características únicas que la hacen muy vulnerable. El grado de presión en la región es alto. De acuerdo con la CONAGUA el volumen concesionado de uso consuntivo para abastecer toda la región es de 2,442.60 hectómetros cúbicos por año (hm<sup>3</sup>/año), de los cuales el 95.3% es destinado para el uso agrícola, lo cual supera el promedio nacional que se estima en un 68%. Además, el 75% del agua en uso proviene de fuentes superficiales.

● **INFORMACIÓN Y MÉTODOS**

● **Índice de escasez hídrica (wsi)**

El wsi es calculado con la siguiente ecuación:

$$WSI = \frac{W_i}{WA_i - EWR_i} \quad (1)$$

Donde:  $w_i$  = demanda de agua anual para diferentes usos (hm<sup>3</sup>/año),  $WA_i$  = disponibilidad natural anual de agua superficial y subterránea (hm<sup>3</sup>/año) y  $EWR_i$  = requerimientos ambientales de agua (hm<sup>3</sup>/año).

Para clasificar el wsi se toma en consideración la relación uso/disponibilidad, a la cual se le ha denominado relación crítica o de criticidad (CR, por sus siglas en inglés). En la tabla 1 se muestra la clasificación del wsi.

La  $W_i$  se obtiene del registro público de derechos de agua (REPDA), de acuerdo a la ubicación geográfica de las concesiones de los aprovechamientos y el tipo de fuente dentro de la cuenca (figura 1). La  $WA_i$  superficial se determinó por el método lluvia-escorrimento recomendado por la SEMARNAT en la NOM-011-CONAGUA-2015. La  $WA_i$  subterránea se obtuvo con base a la información oficial de disponibilidad por acuíferos de la CONAGUA (2018a). Los  $EWR_i$  se estimaron como un porcentaje (30%) de la disponibilidad de agua superficial considerando la recomendación para el mantenimiento en buenas condiciones y supervivencia de la mayoría de las formas de vida acuática de los ecosistemas dependientes del agua dulce (Tennant, 1976).

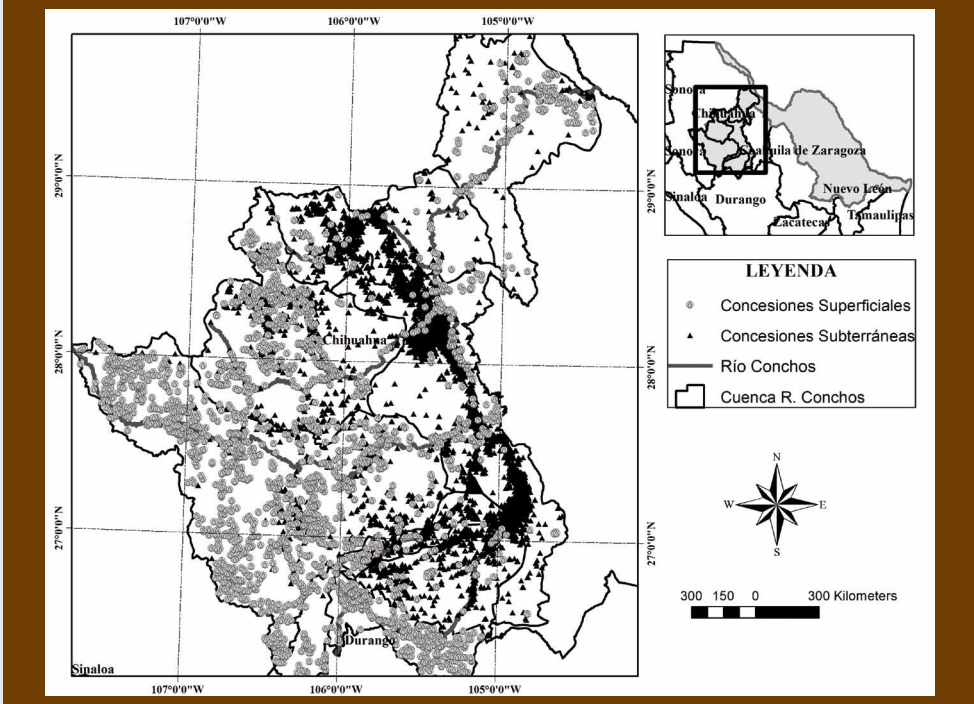
En la tabla 2 se muestra el resumen de las variables involucradas para el cálculo del wsi por subcuenca.

◆ **RESULTADOS**

Una vez contando con las variables necesarias analizadas ( $W_i$ ,  $WA_i$  y  $EWR_i$ ) se puede calcular el wsi conforme a la ecuación 1 para cada una de las subcuencas. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 1. Aprovechamientos superficiales y subterráneos de la cuenca del río Conchos.**



Elaborada con información de CONAGUA (2018b).

**• Discusión de resultados**

Los resultados de la tabla 3 manifiestan que la mayor parte de la cuenca del río Conchos está en una condición crítica. La única subcuenca donde no hay estrés hídrico es la zona alta, donde llueve más, dando como resultado un escurrimiento mayor, contando con más del 45% del agua renovable de toda la cuenca. Ahí la población es menor a la del resto de las subcuencas, por consiguiente, es poca la demanda de agua para uso público-urbano, además de no contar en esta zona con importantes demandas para riego agrícola.

Las subcuencas con grados «altos» de escasez (R. Florido y R. Conchos 4) más importantes aquellas donde se encuentran distritos de riego importantes en la zona: 103 río Florido y 090 bajo río Conchos, respectivamente. Además

**Tabla 2. Valores de las variables para el cálculo del wsi.**

Subcuenca	$W_i$	$WA_i$	$EWR_i$
R. Conchos - P. de la Colina	54.87	1,236.88	327.11
Río Parral	40.40	60.09	18.03
Río Florido	142.53	321.23	79.77
San Pedro	287.55	314.14	94.24
Conchos 2	350.43	304.12	91.24
Conchos 3	157.59	152.41	34.91
Conchos 4	105.78	219.23	47.15
Σ=	1,139.14	2,608.10	692.44



Tabla 3. Resultados del cálculo del wsi.

Subcuenca	WSI	Grado de estrés
R. Conchos - P. de la Colina	0.060	Sin Estrés
Río Parral	0.961	Muy Alto
Río Florido	0.590	Alto
San Pedro	1.308	Extremadamente Alto
Conchos 2	1.646	Extremadamente Alto
Conchos 3	1.341	Extremadamente Alto
Conchos 4	0.615	Alto

de ciudades como Santa Barbara, Mariano Matamoros, Villa Ocampo, Villas las Nieves, José Esteban Coronado, José Mariano Jiménez, más comunidades rurales en la subcuenca R. Florido (67,083 habitantes en total) y Santiago Coyame, Manuel Ojinaga, más comunidades rurales en la subcuenca del R. Conchos 4 (25,960 habitantes en total).

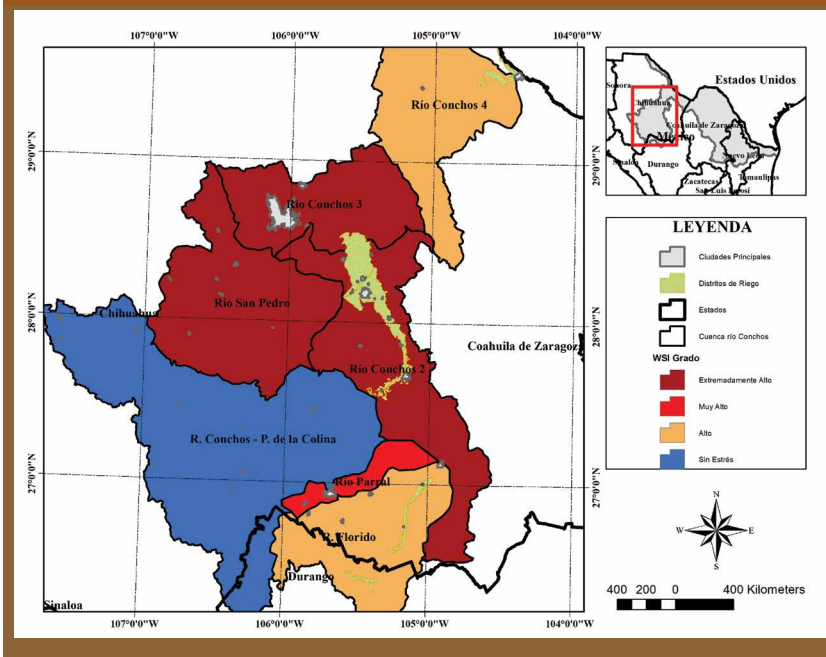
Las subcuencas con un grado «extremadamente alto» de escasez son: 1) R. Conchos 2, donde están asentados los distritos de riego más grandes de la región: 005 Delicias y 113 alto río Conchos, además de demandar un poco más del 30% del volumen de agua para todos los usos de toda la cuenca, 2) R. Conchos 3, donde se encuentra la ciudad de Chihuahua, siendo la ciudad con más habitantes (809 mil) y 3) R. San Pedro, que demanda un poco más del 25% del volumen total de agua de toda la cuenca. En la figura 2 se muestran los resultados del WSI por subcuenca.

Una variable importante considerada es el EWR, el cual impacta en cada una de las subcuencas, ya que, si se descuentan los requerimientos ambientales de agua para el medio ambiente en este análisis, el grado de escasez queda en «alto» para las subcuencas Parral, Florido, San Pedro y Conchos 4 y «muy alto» para Conchos 2 y Conchos 3.

## CONCLUSIONES

El WSI es un indicador que permite analizar la disponibilidad de agua de una región o cuenca donde se implemente. Pero su alcance va mucho más allá de sólo «indicar» si hay o no agua disponible, sino que es una herramienta de gestión que evalúa si se cuenta con información histórica de las demandas concesionadas contra el escurrimiento natural a través de los años y, con ello, ayudar a los administradores del agua a tomar mejores decisiones conforme a las tendencias resultantes. También permite

Figura 2. Resultados del wsi por subcuenca.



focalizar cuencas críticas, como la analizada en este trabajo, con el objetivo de priorizar e implementar una gestión hídrica más eficiente. Por último, el WSI, soportado en un sistema de información geográfico (SIG), permite evaluar las regiones con asentamientos urbanos o agrícolas que demandan más agua en una cuenca, y con ello proponer e implementar medidas sustentables: como reúso, tecnificación, recarga artificial de acuíferos, etcétera. De igual for-

ma, esta herramienta de gestión podría ayudar a establecer políticas públicas que contribuyan a la conservación del recurso.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos y a la Universidad de las Américas Puebla por todo el apoyo y las facilidades prestadas para la elaboración de esta investigación.



### Paul Hernández-Romero

Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Baja California. Maestro en Ingeniería y actualmente candidato a doctorado en Ciencias del Agua por la Universidad de las Américas Puebla. Su tesis doctoral se titula: "Índice de seguridad hídrica para México". Actualmente es líder climático y voluntario en The Climate Reality Project. [paul.hernandezro@udlap.mx](mailto:paul.hernandezro@udlap.mx)



### Carlos Patiño-Gómez

Ingeniero civil de profesión y maestro en Ciencias en Hidráulica, egresado del Instituto Politécnico Nacional. Tiene el título de doctor en Ingeniería Civil y un post-doctorado en Ingeniería Civil, con especialidad en recursos hídricos y medio ambiente, por parte de la Universidad de Texas en Austin, EE.UU.. Miembro del SNI - Nivel 1. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de las Américas Puebla. [carlos.patino@udlap.mx](mailto:carlos.patino@udlap.mx)



### Benito Corona Vásquez

Doctor en Ingeniería Ambiental y Maestro en Ciencias por la University of Illinois at Urbana-Champaign. EL Dr. Corona es de los principales expertos en el país sobre el impacto que tiene la desinfección secuencial sobre la calidad microbiológica del agua, constantemente realiza proyectos relacionados con metodologías alternativas para el tratamiento de agua potable y residual, así como la comprensión de los mecanismos involucrados en la inactivación microbiológica con desinfección química, física y secuencial. Actualmente, es miembro de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos con sede en la UDLAP. [benito.corona@udlap.mx](mailto:benito.corona@udlap.mx)



### Polioptro F. Martínez-Austria

Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Autor de 192 publicaciones académicas, entre artículos científicos, libros y capítulos de libros. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1994. Actualmente profesor de la UDLAP y director de la Cátedra UNESCO-UDLAP en riesgos Hidrometeorológicos. Ha recibido diversos reconocimientos nacionales e internacionales. [polioptro.martinez@udlap.mx](mailto:polioptro.martinez@udlap.mx)

## REFERENCIAS

• CONAGUA. (19 de junio de 2018a). *Aguas subterráneas*. Recuperado de: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad\\_Acuiferos.html](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html)

• CONAGUA. (18 de diciembre de 2018b). *Datos Abiertos*. Otorgamiento de concesiones, asignaciones y permisos para el uso, explotación y/o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/concesiones-asignaciones-permisos-otorgados-y-registros-de-obras-situadas-en-zonas-de-libre-alu/resource/39b4278f-6796-47c3-ada2-31778b00f7c7>

• Smakhtin, V., Revenga, C. y Döll, P. (2004). *Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments*. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat.

• Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 6-10. doi:10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2

• Vörösmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A. y Revenga, C. (2005). Geospatial Indicators of Emerging water stress: An Application to Africa. *AMBIO*, 34(3), 230-236.

• Vörösmarty, C. J., Lévêque, C. y Revenga, C. (2005). Fresh Water. En *Ecosystem and Human Well-being: Current Satate and Trends, Volume 1* (pp. 167-207). Washington, D.C.: IslandPress.

- Occurrence of anti-inflammatory drugs as emerging pollutants in the rivers of the world: a systematic review

# OCURRENCIA DE FÁRMACOS ANTIINFLAMATORIOS COMO CONTAMINANTES EMERGENTES EN LOS RÍOS DEL MUNDO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Por:  Rosa Edith Grijalva-Guiza · Mildred María López-Vázquez · Mónica Cerro-López · Maria Luisa Toledo-Wall · Lucila Isabel Castro-Pastrana

## RESUMEN

En todo el mundo, los fármacos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) son de fácil acceso y de amplio consumo. La ineficiencia de los métodos convencionales para removerlos de las aguas residuales y su toxicidad sobre organismos acuáticos los han convertido en contaminantes emergentes. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión sistemática de la literatura publicada entre 2008 y 2018 sobre la ocurrencia de AINEs en los ríos del mundo. Después de aplicar los criterios de inclusión se obtuvieron siete artículos que estudiaron en total doce ríos en Asia, Europa y América. El diclofenaco y el ibuprofeno fueron los AINEs más estudiados y, junto con el paracetamol y la aspirina, fueron también los encontrados en mayores concentraciones. El río chileno Maipo presentó los niveles más altos para 4 de 6 AINEs reportados. Los resultados muestran la necesidad de monitorizaciones ambientales que permitan aplicar medidas correctivas y regulatorias de protección ambiental.



◆◆ PALABRAS CLAVE:  
AINES · Anti-inflamatorios no esteroideos · Contaminantes emergentes · Ríos, aguas superficiales

◆◆ ABSTRACT

Throughout the world, non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) are easily accessible and widely consumed. The inefficiency of conventional methods to remove them from wastewater and their toxicity on aquatic organisms have turned them into emerging pollutants. The objective of this work was to carry out a systematic review of the literature published between 2008 and 2018 on the occurrence of NSAIDs in the world's rivers. After applying the inclusion criteria, we obtained 7 articles that studied a total of 12 rivers in Asia, Europe and America. Diclofenac and ibuprofen were the most studied NSAIDs and together with paracetamol and aspirin were also found in higher concentrations. The Chilean Maipo River presented the highest levels for 4 out of 6 reported NSAIDs. The results show the need for environmental monitoring in order to effectively apply corrective and regulatory measures of environmental protection.

◆◆ KEY WORDS:  
NSAIDs · Nonsteroidal anti-inflammatory drugs · Emerging contaminants · Rivers · Surface waters

◆◆ INTRODUCCIÓN

Se consideran contaminantes emergentes a todas aquellas sustancias químicas cuya presencia es desconocida o ignorada por la carencia de regulación y monitoreo hasta que causan efectos tóxicos en el ambiente o alteran la salud de los organismos vivos. Se les encuentra alterando la composición de las aguas y aún en bajas concentraciones tienen efectos negativos en la vida acuática. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARS) no los eliminan por completo y se combinan con otros contaminantes. En combinación pueden sinergizarse e inducir cambios en los organismos acuáticos (Pérez-Álvarez *et al.*, 2018) y, eventualmente, en el ser humano (Margel y Fleshner, 2011).

Un subgrupo importante de contaminantes emergentes lo comprenden los principios activos (fármacos) de los medicamentos por su amplio uso, su baja biodegradabilidad con métodos convencionales y porque se eliminan continuamente en el medio ambiente. Las excretas humanas, la actividad industrial, su uso agrícola y las malas prácticas para su desecho



## SE CONSIDERAN CONTAMINANTES EMERGENTES

A TODAS AQUELLAS SUSTANCIAS QUÍMICAS CUYA PRESENCIA ES DESCONOCIDA O IGNORADA POR LA CARENCIA DE REGULACIÓN Y MONITOREO HASTA QUE CAUSAN EFECTOS TÓXICOS EN EL AMBIENTE O ALTERAN LA SALUD DE LOS ORGANISMOS VIVOS.

constituyen las principales fuentes de contaminación por medicamentos. Los efluentes hospitalarios, por ejemplo, pueden ser hasta quince veces más tóxicos que los domésticos y, sin embargo, llegan a las PTAR públicas sin tratamiento previo (Palacios-Rosas y Castro-Pastrana, 2019). Recientemente se ha propuesto una lista de contaminantes de importancia potencial para México, entre los que destacan cinco fármacos del grupo de los antiinflamatorios no esteroideos (AINE): ácido mefenámico, ibuprofeno, diclofenaco, nimesulida y ketoprofeno (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2015).

En la última década, varios estudios en todo el mundo han reportado, tras el análisis de aguas superficiales de ríos, la presencia de compuestos químicos de origen farmacéutico, particularmente del grupo de los AINE (Khan *et al.*, 2018; Huebner *et al.*, 2015; Shanmugam *et al.*, 2014; Ascar *et al.*, 2013; Stasinakis *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2010).

Los AINE conforman un grupo de medicamentos muy utilizados globalmente. Debido a su amplio uso para el manejo del dolor y la inflamación por diversas causas, se estima que aproximadamente del 5 al 10% de todos los medicamentos que se prescriben cada año son AINE (Wongrakpanich *et al.*, 2018). Tan sólo en los Estados Unidos, cada año se emiten más de setenta millones de recetas de AINE y junto con su uso por venta libre, se alcanza un consumo anual de hasta treinta billones de dosis de estos medicamentos (Wiegand *et al.*, 2017).

Después de su consumo, los compuestos activos de estos medicamentos, así como sus metabolitos, son excretados al medio ambiente por medio de la orina y las heces, por lo que constituyen una fuente importante de contaminantes emergentes que además son reemplazados continuamente en el ambiente.

Debido a su fácil accesibilidad, y a que en la mayoría de los países los AINE son de venta libre, su uso no ha sido regulado ni monitoreado a lo largo de los años, por lo que la evidencia sobre su impacto ambiental y sobre la salud humana aún es incipiente (Ascar *et al.* 2013).

Considerando que los ríos son un punto final de llegada de fármacos como contaminantes, es importante monitorearlos y conocer las concentraciones a las que llegan para estimar la magnitud del problema, para promover el análisis de fuentes y destinos previos de estas sustancias, para incentivar el diseño de estrategias más efectivas de descontaminación del agua y para impulsar la mejora regulatoria en el tema. Por lo anterior, y considerando la importancia de abordar este tema de interés para la salud pública, este trabajo tuvo como objetivo el realizar una revisión sistemática de la bibliografía disponible de los últimos diez años sobre la contaminación con AINE de las aguas de ríos del mundo.

### CONTAMINANTES DE IMPORTANCIA POTENCIAL PARA MÉXICO:

Entre los que destacan cinco fármacos del grupo de los antiinflamatorios:

1. Ácido mefenámico

2. Ibuprofeno

3. Diclofenaco

4. Nimesulida

5. Ketoprofeno

**METODOLOGÍA**

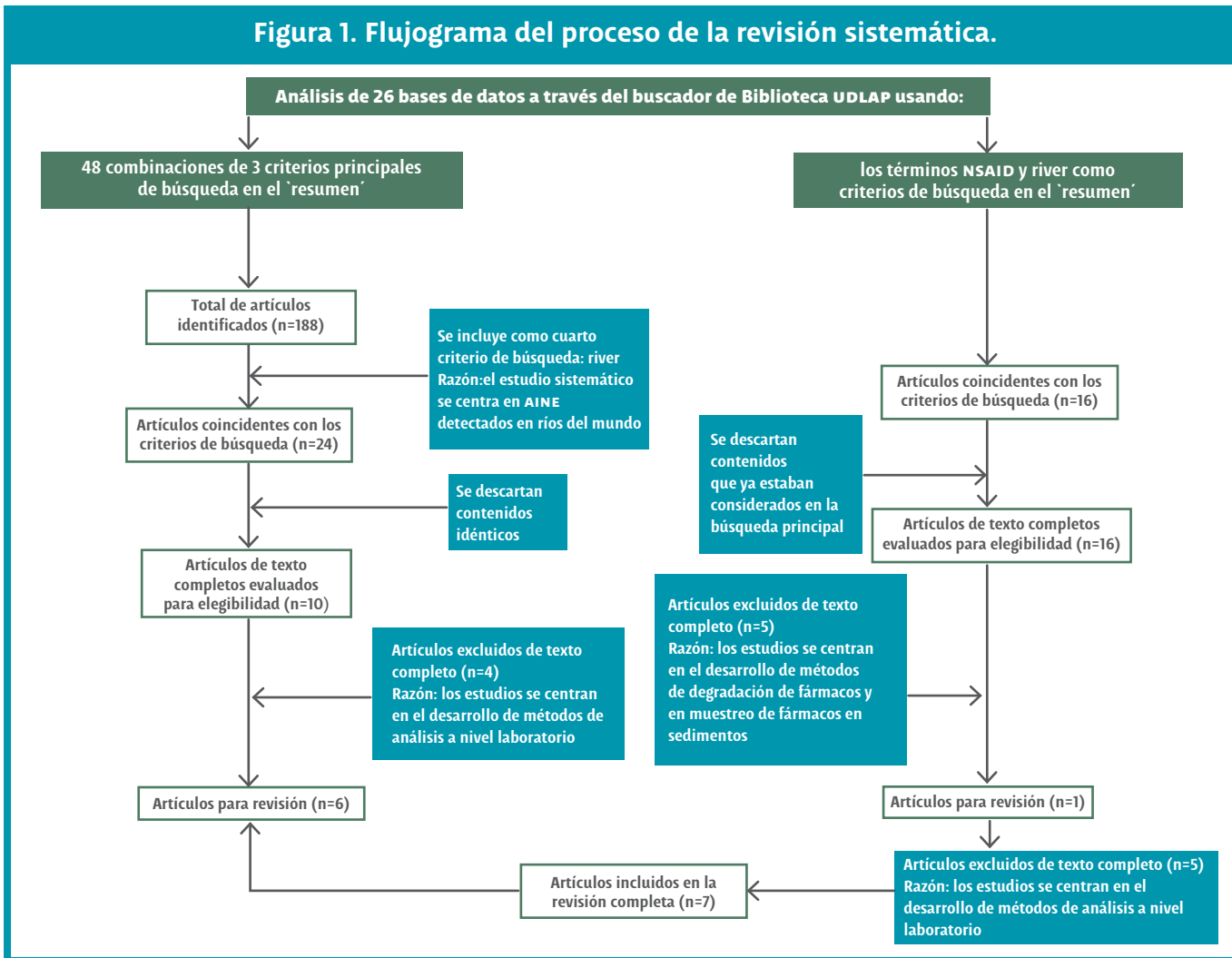
Para esta revisión se utilizó el buscador UDLAP, el cual contiene 26 bases de datos, entre las que destacaron para los fines de este trabajo: Academic Search Complete, ACS Publications, EBSCO Host, Food Science Source, Medline complete, SAGE Journals, SciFinder, Springer Link y Web of Science.

Se recopilaron todos los documentos existentes de 2008 a 2018 utilizando los siguientes criterios de búsqueda avanzada: («NSAID» o «non-steroidal anti-inflammatory») AND («water» o «water pollution» o «waste water» o «effluent») AND («aquatic» o «occurrence» o «detection» o «fate» o «contaminant» o «pollutant»). Todas las palabras clave fueron buscadas en el resumen o *abstract*; de las 48 combinaciones resultantes se encontraron 184 coincidencias. Posteriormente se adicionó a

cada búsqueda un cuarto criterio con fin de exclusión, la palabra clave fue «river», hallando 24 coincidencias. En una búsqueda adicional utilizando el buscador UDLAP se introdujeron los criterios «NSAID» y «river» incluidos en el resumen entre los años 2008 y 2018 resultando 16 coincidencias. De manera independiente, dos revisores compararon y excluyeron resultados idénticos, con lo cual la búsqueda se redujo a dieciséis artículos que fueron seleccionados para lectura completa.

Nueve de los artículos seleccionados para lectura se basaron en el desarrollo de métodos para identificación de AINE, en métodos para degradación de fármacos o en el análisis de fármacos en sedimentos, pero no incluían datos de cuantificación de los fármacos, por lo que se descartaron de la revisión (ver figura 1).

**Figura 1. Flujoograma del proceso de la revisión sistemática.**



## RESULTADOS

Los resultados de la revisión se concentraron en la tabla 1. Se presentan los límites de detección para cada fármaco analizado, así como sus valores máximos, ya que no todos los estudios reportan mínimos y máximos encontrados. De los doce ríos estudiados, nueve son asiáticos, dos europeos y sólo se encontró un estudio en América, como se muestra en el mapa (ver figura 2). Los resultados más recientes encontra-

dos en esta revisión se han llevado a cabo en los ríos Indus y Kabul, en Pakistán. En este país no existe un programa para el tratamiento de las aguas residuales que desembocan en los ríos, por lo que la presencia de sustancias químicas, incluyendo los AINE es constante. Las muestras se recolectaron cada lunes en días soleados, sin haber llovido 48 horas antes del muestreo, en los meses de octubre y noviembre (Khan *et al.*, 2018).

**Tabla 1. Concentraciones máximas de AINE medidas en aguas de ríos del mundo.**

Río	País	Diclofenaco (ng/L) [LOD (ng/L)]	Ibuprofeno (ng/L) [LOD (ng/L)]	Ketoprofeno (ng/L) [LOD (ng/L)]	Naproxeno (ng/L) [LOD (ng/L)]	Otros AINEs (ng/L) [LOD (ng/L)]	Método de detección	Referencia
Indus	Pakistán	0.06* [ 2]	2.6 [ 2]	n.d.	n.d.	174.5 [ 5] Paracetamol	LC-MS/MS	Khan <i>et al.</i> , 2018
Kabul	Pakistán	0.18* [ 2]	11.8 [ 2]	n.d.	n.d.	3650 [ 5] paracetamol	LC-MS/MS	Khan <i>et al.</i> , 2018
Shenyang	China	n.d.	n.d.	2202 [ 18]	438 [ 12]	441 [ 91] Ácido mefenámico, 462 [ 76] Ácido tolfenámico, 366 [ 56] Piroxicam	UHPLC-MS/ MS	Guan <i>et al.</i> , 2016
Isar	Alemania	79 (Elisa), 66 (LC-MS) [ 7.8], n.r.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	ELISA,LC-MS	Huebner <i>et al.</i> , 2015
Vellar, Kaveri, Tamiraparani	India	103 [0.09]	200 [0.07]	100 [0.05]	28 [0.09]	660 [0.06] Ácido acetilsalicílico	GC-MS	Shanmugam <i>et al.</i> , 2014
Maipo	Chile	874.1 [ 23.3]	788.7 [ 35.4]	830.9 [ 15.8]	547.7 [ 5.8]	n.d.	HPLC-DAD	Ascar <i>et al.</i> , 2013
Aisonas	Grecia	1043 n.r.	67 n.r.	395 [ 0.37]	322 n.r.	n.d.	GC-MS	Stasinakis <i>et al.</i> , 2012
Liuxi **	China	11 [ 1.1]	11.3 [ 0.7]	n.d.	n.d.	63 [ 2.6] Ácido salicílico	GC-NCI/MS	Zhao <i>et al.</i> , 2010
Shijing **	China	150 [ 1.1]	685 [ 0.7]	n.d.	125 [ 1.3]	14736 [ 2.6] Ácido salicílico, 24.6 [ 2.2] Ácido mefenámico	GC-NCI/MS	Zhao <i>et al.</i> , 2010
Zhujiang**	China	32.7 [ 1.1]	31.1 [ 0.7]	n.d.	5.4 [ 1.3]	143 [ 2.6] Ácido salicílico 7 [ 2.2] Ácido Mefenámico	GC-NCI/MS	Zhao <i>et al.</i> , 2010

LC-MS-MS: Microextracción en fase sólida acoplado con cromatografía líquida en secuencia repetida de espectrometría de masas; UHPLC-MS/MS: Cromatografía líquida de ultra-alto rendimiento con espectrometría de masas en tándem (secuencia repetida); ELISA: ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas; LC-MS: cromatografía líquida-espectrometría de masas; GC-MS: cromatografía de gases-espectrometría de masas; HPLC-DAD: Cromatografía líquida de alta resolución usando detector de arreglo de diodos; GC-NCI/MS: cromatografía de gases-ionización química en espectrometría de masas.

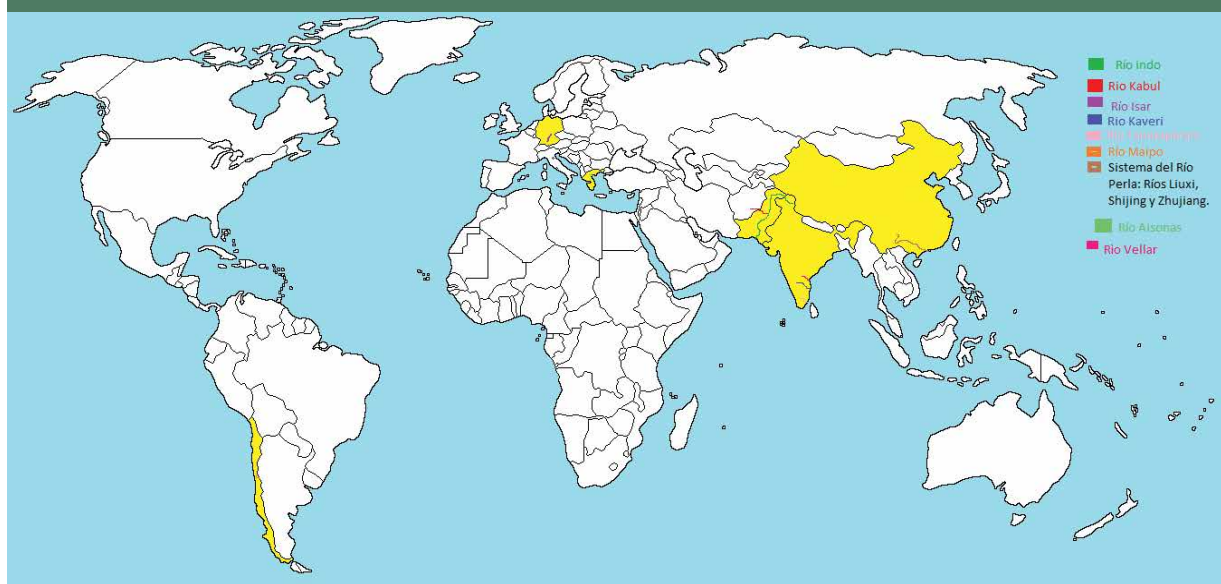
n.r. = no reportado.

n.d. = no se determinó. AINEs = fármacos anti-inflamatorios no esteroideos. LOD = límite de detección

\*Valores promedio reportados, al tener mediciones iguales a cero promediadas genera valores menores al LOD

\*\*Sistema del río Perla: ríos Liuxi, Shijing y Zhujiang.

**Figura 2. Ubicación en el mundo de los ríos contaminados por fármacos anti-inflamatorios no esteroideos (AINE) incluidos en la revisión sistemática.**



Las aguas residuales de la región de Mardán, al norte de Pakistán, llegan a drenajes abiertos, formando la corriente de Kalpani que desemboca en el río Kabul y, finalmente, se une al río Indus al sur del país. Estas aguas caen en canales de irrigación, poniendo en riesgo la vida acuática, contaminando los suelos y las aguas subterráneas. El manejo de aguas de desecho es similar en todo el país (Khan *et al.*, 2018).

Los AINE que se encuentran en concentraciones más altas en las aguas de ríos en Pakistán son el paracetamol (detectado con un promedio de 3640 ng/L), el ibuprofeno y el diclofenaco. En la corriente de Kalpani las concentraciones fueron mayores que en los ríos Kabul e Indo, ya que en ella existe una menor degradación que en los otros ríos, a donde llegan después estas aguas (Khan *et al.*, 2018).

El paracetamol es uno de los AINE de venta libre con mayor presencia en las aguas residuales en Pakistán, comparado con los resultados de otros países. También los resultados en

las concentraciones de diclofenaco e ibuprofeno son mayores que en otros sitios (Khan *et al.*, 2018).

Por su parte en Asia, en los ríos Vellar, Kaveri y Tamiraparani, principales ríos en India situados al sur del país, las concentraciones de AINE han sido similares a las encontradas en otras partes del mundo, en un rango de n.d. hasta los 200 ng/L (n.d. = no detectado), excepto para el ácido acetilsalicílico que se encontró en concentraciones hasta de 660 ng/L (Shanmugam *et al.*, 2014).

Por su parte, en China, Zhao et al., (2010) reportaron la presencia de AINE en el sistema Pearl compuesto por los ríos Liuxi, Shijing y Zhujiang. Se usó como sitio de control el río Liuxi por ser el de menor contaminación y actividad humana; otros catorce sitios fueron elegidos para recolectar muestras, en las cuales fueron encontrados los siguientes AINE: ácido salicílico, ibuprofeno, naproxeno, ácido mefenámico y diclofenaco. El ácido salicílico junto



**EL AINE QUE SE ENCUENTRA EN CONCENTRACIONES MÁS ALTAS EN LAS AGUAS DE RÍOS EN PAKISTÁN ES EL PARACETAMOL.**

con el ibuprofeno fueron los fármacos con mayores niveles de detección, alcanzando concentraciones medias de 66 y 17.5 ng/L y concentraciones máximas de 14736 y 685 ng/L, respectivamente. El diclofenaco fue el tercer AINE mayormente detectado, con una concentración media de 17.6 ng/L y una concentración máxima de 150 ng/L. Los fármacos con menor presencia fueron el naproxeno y el ácido mefenámico en concentraciones medias de 20.9 y 7.1 ng/L respectivamente (Zhao *et al.*, 2010). Al norte de China, Guan y colaboradores detectaron la presencia de seis antiinflamatorios en el canal Sur de Shenyang: ketoprofeno, ácido mefenámico, ácido tolfenámico, naproxeno, sulindaco y piroxicam, siendo el ketoprofeno el fármaco de mayor presencia, con una concentración de 2202 ng/L, seguido por el ácido tolfenámico, ácido mefenámico y naproxeno (462, 441, 438 ng/L, respectivamente) que, aunque están presentes en cantidades considerables, resultan mucho menores en comparación con el ketoprofeno (Guan *et al.*, 2016).

A su vez, en Europa, se analizaron muestras de agua de los ríos Isar (Alemania) y Aisonas (Grecia). El río Isar atraviesa la región de Bavaria en Alemania, por diferentes localidades como Scharnitz, Munich, Freising y Marzling. En Alemania se analizaron aguas superficiales para determinar las concentraciones de diclofenaco en el río Isar utilizando el método de ELISA (79 y 25 ng/L) y por LC-MS (66 a 25 ng/L) como método de referencia para las mismas muestras (Huebner *et al.*, 2015).

El río Aisonas que se sitúa al norte de Grecia, es impactado por las actividades humanas que se traducen entre un 4% a 12% de las aguas provenientes de PTAR en su flujo total. Las muestras para el estudio de AINE se tomaron en cuatro puntos del río, en la temporada de baja precipitación, encontrándose para ibuprofeno, naproxeno, ketoprofeno y diclofenaco valores

medios entre 1345 ng/L y 2704

ng/L. Asimismo se muestreó la salida de una PTAR en la cual se encontró una concentración media máxima de diclofenaco de 3328 ng/L y una pequeña concentración para el resto de los fármacos, llegando a una descarga diaria hacia el mar Egeo de 4 g de ibuprofeno y 82 g de diclofenaco (Stasinakis *et al.*, 2011).

Finalmente, en América, muestras del río Maipo, en Chile, fueron recolectadas antes y después de pasar por las PTAR. Se tomaron trece muestras divididas en dos partes, las cuales tenían un pH entre 7.28 y 8.23. Se determinó la presencia de naproxeno, ketoprofeno e ibuprofeno en un intervalo de concentraciones de 320-550 ng/L. Sólo la muestra cercana a la PTAR mostró la presencia de diclofenaco, además se cuantificó una mayor cantidad de ibuprofeno que de ketoprofeno y naproxeno, lo cual sugiere un mayor consumo de este último fármaco en dicha región (Ascar *et al.*, 2013).

#### ● Métodos utilizados para el análisis en las diferentes regiones

La presencia de fármacos en las aguas superficiales se ha convertido en un riesgo prioritario, ambiental y sanitario, a caracterizar, gestionar y en consecuencia, minimizar. En términos analíticos sus concentraciones son muy bajas, por lo que, para implementar regulaciones y programas de monitoreo, se requieren métodos de análisis altamente sensibles y selectivos que permitan detectar y cuantificar contaminantes farmacéuticos en muestras de agua de ríos y aguas residuales.

El método utilizado para el análisis de AINE en aguas de ríos en Pakistán se basó en un cromatógrafo de líquidos Agilent serie 1200 acoplado con un espectrómetro de masas Agilent serie 6460 (LC-MS/MS). Todas las muestras fueron filtradas (Khan *et al.*, 2018).

Por su parte, el método de ELISA con anticuerpos monoclonales específicos para diclofenaco es de bajo costo, rápido, fácil de realizar, robusto, altamente sensible y reproducible para muestras de agua superficiales y de desecho (Huebner *et al.*, 2015).

Las muestras de la India se analizaron con un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro cuádruple de masas, procesando las muestras de acuerdo al método de Togola y Budzinski (2007) con muy pocas modificaciones (Shanmugam *et al.*, 2014).





## LA PRESENCIA DE FÁRMACOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES SE HA CONVERTIDO EN UN RIESGO PRIORITARIO, AMBIENTAL Y SANITARIO, A CARACTERIZAR, GESTIONAR Y EN CONSECUENCIA, MINIMIZAR.

La cuantificación de AINE en las muestras del río Maipo se realizó a través de cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD), técnica que tiene una alta sensibilidad en la cuantificación de naproxeno y que puede ser de utilidad para muchos laboratorios químicos debido a su disponibilidad (Ascar *et al.*, 2013).

Para los análisis cuantitativos y cualitativos de las muestras recolectadas en los ríos Vellar, Kaveri, Tamiraparani (India), Aisonas (Grecia) y en el sistema de ríos Pearl (China) se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas; dicha técnica presentó una precisión satisfactoria en la medición (Stasinakis *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2010).

El método, mediante el cual se determinaron simultáneamente seis antiinflamatorios en el Canal Sur de Shenyang, resulta no estar descrito previamente en la literatura y se llevó a cabo utilizando microextracción líquido-líquido dispersivo asistido por ultrasonido (DLLME), seguido de cromatografía líquida de ultra-alto rendimiento con espectrometría de masas en tándem (UHPLC-MS/MS) (Guan *et al.*, 2016).

### DISCUSIÓN

Al ser una revisión de tipo sistemática se siguió una metodología estricta en la búsqueda de artículos, en la cual «NSAID» o «non-steroidal anti-inflammatory» fue el término principal, seguido de dos términos relacionados con el tema de contaminación de aguas. De esta manera quedaron excluidos de la búsqueda algunos artículos que, aun habiendo analizado AINES en ríos, no incluían dicho término en el contenido de su resumen o *abstract*. Para revisiones sistemáticas futuras será importante incluir en los términos de búsqueda los nombres de los fármacos AINE más usados para incluir otros trabajos que hayan analizado principios activos de diversos grupos. Entre los estudios que tuvieron que excluirse del presente trabajo se encuentra el de Rivera-Jaimes *et al.* (2018) que, por medio de cromatografía líquida acopla-

da a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS), reportó una alta concentración de naproxeno (732-4880 ng/L) y diclofenaco (258-1398 ng/L) en la PTAR de Acapantzingo y en las aguas superficiales del río Apatlaco en Morelos, México. Estos hallazgos ponen de manifiesto la urgente necesidad de estudiar y regular las aguas residuales no tratadas debido a la práctica común en nuestro país de utilizarlas para riego agrícola (Rivera-Jaimes *et al.*, 2018). Otro estudio también excluido, por no mencionar los criterios de búsqueda en el resumen, fue el de Patrolecco *et al.* (2013), que reporta concentraciones en rangos de 200-264 ng/L para naproxeno, n.d.-120 ng/L para diclofenaco, 95-210 ng/L para ibuprofeno y n.d.-150 ng/L para ketoprofeno en el río Tiber, Italia (Patrolecco *et al.*, 2013).

Guzel *et al.* (2018) reportaron concentraciones de diclofenaco (17.60 ng/L) en el río Ceyhan de Turquía, sin embargo, al reportarlo como compuesto activo en farmacéuticos y no como AINE dicho estudio no apareció en la búsqueda sistemática (Guzel *et al.*, 2018).

El consumo de AINE en el mundo se refleja en la contaminación de las aguas residuales y su presencia en las aguas superficiales de ríos que contaminan los mantos acuíferos y los mares. Por su actividad biológica, los contaminantes emergentes, como los fármacos, tienen el potencial de causar diversos daños a la salud o al ambiente, aun en muy bajas concentraciones (Corcoran *et al.*, 2010). Los investigados en esta revisión, los AINE, representan un riesgo ambiental y de salud debido a su alto consumo y a su disponibilidad inmediata sin necesidad de receta médica (Khan *et al.*, 2018; Huebner *et al.*, 2015; Shanmugam *et al.*, 2014; Ascar *et al.*, 2013; Stasinakis *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2010).

Tan sólo en Alemania el consumo de diclofenaco excede las ochenta toneladas por año, en Europa se ha incluido dentro de las sustancias peligrosas que deben ser monitoreadas, además se reportan otros países como Grecia, España e Irlanda con concentraciones altas de diclofenaco detectadas en efluentes (Huebner



**EL CONSUMO DE AINE EN EL MUNDO SE REFLEJA EN LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES Y SU PRESENCIA EN LAS AGUAS SUPERFICIALES DE RÍOS QUE CONTAMINAN LOS MANTOS ACUÍFEROS Y LOS MARES.**



*et al.*, 2015). Del mismo modo se debería establecer este tipo de regulación en otros países como India, Chile y China, donde se encuentran valores mayores al límite propuesto (100 ng/L) para efluentes de plantas de tratamiento de aguas en Europa.

En México, los AINE ocupan alrededor de un 10% del volumen total de medicamentos que produce la industria farmacéutica anualmente (INEGI, 2017). A nivel nacional se ha estimado un consumo anual de ibuprofeno de hasta 0.02 kg per cápita (Castro-Pastrana *et al.*, 2015), y fármacos como el diclofenaco, el naproxeno y el ketorolaco son consumidos por usuarios del Instituto Mexicano del Seguro Social en un orden promedio de treinta, dieciséis y trece millones de piezas cada año, respectivamente (IMSS, 2019). Los AINE que toma la población mexicana con mayor frecuencia cuando se automedica son el ibuprofeno y el diclofenaco y, el paracetamol, que aunque no se clasifica como AINE por carecer de propiedades antiinflamatorias, es un fármaco relacionado que encabeza destacadamente esta lista (PROFECO, 2010). En consecuencia, el paracetamol y los AINE preceden, con un 24%, la lista de sustancias activas más encontradas en las recolecciones de medicamentos caducos, residuos y envases que realiza el Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos AC (SINGREM), resaltando el ácido acetilsalicílico, el diclofenaco y el ibuprofeno (SINGREM, 2014).

Por todo lo anterior, ya se han detectado AINE en importantes cuerpos de agua de México como el Valle del Mezquital (naproxeno, ibuprofeno y diclofenaco) (Siemens *et al.*, 2008); en aguas superficiales y subterráneas de la Ciudad de México como pozos, presas y estanques (ácido salicílico, diclofenaco, naproxeno, ibuprofeno y ketoprofeno) (Félix-Cañedo *et al.*, 2013); y en la región del Valle de Tula, donde se han detectado en el suelo ibuprofeno, naproxeno y diclofenaco debido a que ocurre irrigación con aguas residuales sin tratar (Gibson *et al.*, 2010).

Estos compuestos presentan una estabilidad considerable en fase acuosa y no son eliminados por completo en las PTAR (Jelic *et al.*, 2012). Entre los casos tóxicos ambientales mejor documentados, se encuentra el de las tres especies de buitres que colapsaron de manera importante en el sur de Asia debido a concentraciones de diclofenaco en los riñones de estas aves, llevando a su especie al peligro de extinción (Castro-Pastrana *et al.*, 2015).

El consumo de AINE en exceso, de manera voluntaria o involuntariamente a través del consumo de agua potable contaminada, puede causar graves problemas de salud, tal es el caso del consumo de ibuprofeno en altas concentraciones que actúa como un disruptor endócrino, afectando el balance hormonal. En hombres adultos ha demostrado inducir en los testículos un estado de hipogonadismo compensado, lo cual provoca problemas reproductivos y físicos, además de que se asocia con un riesgo mayor de mortalidad (Kristensen *et al.*, 2018).

La importancia de medir las concentraciones de AINE en las aguas de desecho y ríos es cada vez más necesaria al constatar los daños que pueden causar. Algunos términos que se utilizan para medir la toxicidad y que han ayudado a establecer límites de toxicidad, son los cocientes de peligro HQ (del inglés, *Hazard quotient*) o cocientes de riesgo RQ (del inglés, *Risk quotient*) (Khan *et al.*, 2018). Con estos cocientes (HQ o RQ) se puede predecir si una sustancia puede tener efectos adversos a la salud como resultado de la exposición. Se calculan como la razón entre la concentración ambiental medida MEC (*Measured Environmental Concentration*) del fármaco y su concentración prevista sin efecto PNEC (*Predicted No-Effect Concentration*), donde MEC corresponde a la concentración de fármaco más alta encontrada en muestras reales analizadas y PNEC es la concentración en el agua que no causa efecto. Las concentraciones PNEC se calculan a partir del valor más bajo de concentración media efectiva ( $CE_{50}$ ) o letal ( $CL_{50}$ ) para organismos acuáticos, datos que se obtienen de estudios de ecotoxicidad reportados en la bibliografía, realizados con especies centinelas o indicadoras. El criterio de clasificación de riesgo potencial comúnmente utilizado es el valor de HQ. Los valores HQ entre 0.1 y 1 representan un riesgo bajo o insignificante, mientras que para valores HQ entre 1 y 10 se espera un riesgo medio. Finalmente, los valores HQ superiores a 10 indican un alto riesgo ecológico (Rivera-Jaimes, 2018).

$$HQ = \frac{MEC}{PNEC}$$

Es posible calcular los HQ para cada especie acuática que está en contacto con cada uno de los AINE conociendo los datos de MEC y PNEC correspondientes, para conocer el impacto ambiental que en cada sitio es causado por los contaminantes analizados. Estos HQ se cal-

culan para especies sensibles que se utilizan de referencia, como por ejemplo la *Daphnia magna*, algunas algas y peces. En el caso de los ríos Vellar, Kaveri y Tamiraparani en la India, los valores de HQ para todos los organismos analizados fueron menores a 0.1, lo cual corresponde a un riesgo insignificante. Sin embargo, los riesgos potenciales de estos fármacos y otros contaminantes del medio estando mezclados, aún no se conocen (Shanmugam *et al.*, 2014).

Para la corriente de Kalpani en Pakistán se calcularon HQ muy altos para diclofenaco, ibuprofeno y paracetamol que afectan a *Daphnia* y a algas, sin embargo, cuando los contaminantes llegan a los ríos los valores disminuyen considerablemente hasta representar un riesgo medio de los mismos AINE. En el estudio de Khan *et al.* (2018) la degradación más significativa fue observada para diclofenaco, mientras que ibuprofeno y paracetamol permanecieron con valores de HQ en rangos mayores a 0.1 y menores a 1, lo que indica una degradación de estos fármacos por diferentes factores incluyendo el efecto del sol, considerando que la corriente de la que proviene está abierta (Khan *et al.*, 2018).

Los resultados de la cuantificación de AINE en el río Aisonas en Grecia muestran que se descargan diariamente 4 g de ibuprofeno y 82 g de diclofenaco al mar Egeo. La principal fuente de ibuprofeno, ketoprofeno y diclofenaco del río Aisonas es el efluente de la PTAR. Se han calculado los valores de HQ para los contaminantes del río y se recomienda un tratamiento dirigido a la degradación de éstos para evitar su toxicidad (Stasinakis *et al.*, 2011).

En los análisis efectuados en ríos de Pakistán se encontró que, generalmente, la variabilidad en las concentraciones se debió a las descargas de efluentes sin tratamiento de un hospital (Khan *et al.*, 2018).

Cuando las aguas de la corriente de Kalpani son utilizadas para la irrigación de cultivos se ha observado que el paracetamol tiene efectos inhibitorios en la elongación de raíces del trigo, sin embargo, aun en bajas concentraciones de paracetamol el efecto de una exposición crónica no debe ser ignorado (Khan *et al.*, 2018).

Una de las sustancias que se considera prioritaria para monitorearse en la Unión Europea es el diclofenaco, por lo que se han desarrollado técnicas de análisis rápido usando anticuerpos específicos para detectar sus concentraciones tanto en aguas de desecho como

en aguas superficiales de ríos (Huebner *et al.*, 2015). Es necesario tomar medidas similares en todos los países del mundo para prevenir futuros problemas de salud. Se ha propuesto un límite máximo de 100 ng/L para el diclofenaco en los efluentes de las PTAR y en ríos (Huebner *et al.*, 2015).

Aunque el diclofenaco es particularmente difícil de remover en las PTAR (Shanmugam *et al.*, 2014), para el caso de los muestreos en ríos debe ser tomada en cuenta la vía principal de degradación del diclofenaco que *in situ* es la fotodegradación, es decir, que la concentración depende de la estación del año en que se tome la muestra de los ríos (Huebner *et al.*, 2015).

Guan *et al.* (2016) describen un cuadro comparativo de métodos utilizados para determinar compuestos farmacéuticos con algunos otros métodos, en los que se observan que los valores menores de LOD se logran con el método descrito por ellos utilizando (DLLME) UHPLC-MS/MS y el que utiliza extracción de fase sólida (SPE) GC-MS/MS (Guan *et al.*, 2016). Estos dos métodos presentan los menores datos de LOD comparados con el resto de los métodos de esta revisión (tabla 1).

## CONCLUSIONES

En los estudios analizados se refleja la contaminación de diferentes ríos en el mundo por fármacos de tipo antiinflamatorio no esteroideo que tienen la característica de ser de uso frecuente y de consumirse sin receta médica. Este grupo de fármacos tiene el potencial de causar efectos adversos en ecosistemas acuáticos, suelos y aguas subterráneas.

Es importante establecer a la brevedad monitorizaciones ambientales que permitan regular las concentraciones de fármacos en los cuerpos de agua. En este sentido, el análisis de aguas superficiales y residuales por el método de ELISA resulta práctico porque no requiere de un tratamiento adicional para las muestras más que la filtración (Huebner *et al.*, 2015).

Por otra parte, es importante considerar la implementación de métodos de tratamiento capaces de eliminar estos contaminantes. Las PTAR convencionales no logran eliminar por completo los AINE y estos llegan a través de los efluentes a contaminar los ríos en cualquier parte del mundo donde se consume este tipo de medicamentos, por lo que es necesario establecer normas que regulen el tratamiento de las aguas de desecho, para poder garantizar la se-



**LOS AINE QUE TOMA LA POBLACIÓN MEXICANA CON MAYOR FRECUENCIA CUANDO SE AUTOMEDICA SON EL IBUPROFENO, EL DICLOFENACO Y EL PARACETAMOL.**

guridad en cuanto a los riesgos que representa para la salud humana y el medio ambiente.

Las interacciones potenciales de algunos de estos medicamentos como diclofenaco y sus metabolitos con otros contaminantes presentes en las aguas, pone de manifiesto la relevancia de contar con una legislación que asegure el correcto tratamiento de las aguas residuales (Lonappan *et al.*, 2016). En México se requiere monitorear su concentración sobre todo en ríos de poblaciones donde sus aguas sean utilizadas para el riego o el consumo humano (Rivera-Jaimes *et al.*, 2018).

Es prioritaria la determinación de las concentraciones de AINE en las aguas superficiales y tratadas para llevar un mejor control de los residuos y poder tomar medidas correctivas adecuadas que protejan la salud y el medio ambiente. Por último, debe incentivarse la realización de un mayor número de estudios de este tipo para poder documentar adecuadamente este tema en diferentes zonas del mundo, y tener un mayor soporte científico que coadyuve a la legislación ambiental y sanitaria en países como México, porque a pesar de que los cocientes de riesgo HQ reportados actualmente para AINE sugieren un riesgo bajo para el ambiente acuático no se conoce el riesgo potencial que representan estos compuestos químicos como una mezcla con otros contaminantes (Shanmugam *et al.*, 2013).

#### ◆◆ AGRADECIMIENTOS

Las autoras Rosa E. Guijalva y Mildred M. López agradecen a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por financiar sus estudios de Doctorado en Biomedicina Molecular. Las autoras Mónica Cerro y Lucila Castro agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto 3620 en el marco del programa de Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2016.



#### 🌀 Rosa Edith Grijalva-Guiza

Licenciada en Quimicofarmacobiología con especialidad en Análisis Clínicos por la Universidad de las Américas-Puebla (1995), obtuvo el mejor promedio por generación. Egresada de la Maestría en Biotecnología por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (2018) con mención honorífica por Investigación y durante la cual realizó una estancia de investigación en la Universidad de British Columbia, Canadá (verano 2017). Actualmente estudia el Doctorado en Biomedicina Molecular en la UDLAP. [rosa.grijalvaga@udlap.mx](mailto:rosa.grijalvaga@udlap.mx)



#### 🌀 Mildred María López-Vázquez

Licenciada en Ingeniería Química por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) donde también obtuvo la Maestría en Ciencias Químicas. Actualmente es estudiante del doctorado en Biomedicina Molecular en la UDLAP. [mildred.lopez@udlap.mx](mailto:mildred.lopez@udlap.mx)



#### 🌀 Mónica Cerro-López

Doctora en Electroquímica por el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQU). Es profesora de tiempo completo en la UDLAP y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Actualmente es líder del proyecto de investigación «Eliminación de contaminantes emergentes de aguas residuales mediante el empleo de nanocomposites a base de materiales de carbono y dióxido de titanio», financiado por CONACYT. [monica.cerro@udlap.mx](mailto:monica.cerro@udlap.mx)



#### 🌀 Maria Luisa Toledo-Wall

Estudia las Licenciaturas en Bioquímica Clínica y en Ciencias Farmacéuticas en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Es miembro del Programa de Honores en el proyecto de investigación titulado «Caracterización epidemiológica de la seguridad en el uso de los medicamentos en los hospitales mexicanos». Actualmente está realizando un intercambio académico en Ludwig-Maximilians Universität en Alemania. [maria.toledowl@udlap.mx](mailto:maria.toledowl@udlap.mx)



#### 🌀 Lucila Isabel Castro-Pastrana

##### AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Doctora en Bioquímica Farmacéutica por la Universidad de Tübingen, Alemania. Fue profesora visitante en la Universidad de British Columbia en temas de farmacovigilancia y farmacogenómica. Es autora y compiladora de 3 libros sobre farmacovigilancia. Se encuentra certificada por trayectoria profesional en el perfil Farmacia por el Colegio Nacional de Químicos Farmacéuticos Biólogos México. Es profesora de tiempo completo de la UDLAP. [lucila.castro@udlap.mx](mailto:lucila.castro@udlap.mx)

## REFERENCIAS

- Ascar, L., Ahumada, I., López, A., Quintanilla, F. y Leiva, K. (2013). Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drug Determination in Water Samples by HPLC-DAD under Isocratic Conditions. *J. Braz. Chem. Soc.*, 24, 1160-1166.
- Castro-Pastrana, L., Baños-Medina, M., López-Luna, M. y Torres-García B. (2015). Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación. *Rev. Mex. Cienc. Farm.*, 46(3), 16-40.
- Corcoran, J., Winter, M. J. y Tyler, C. R. (2010). Pharmaceuticals in the aquatic environment: a critical review of the evidence for health effects in fish. *Crit Rev Toxicol* 40, 287-304.
- Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C. y Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Sci y Total Environ.* 454-455; 109-18.
- Gibson, R., Durán-Álvarez, J. C., Estrada, K. L., Chávez, A. y Jiménez-Cisneros, B. (2010). Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico. *Chemosphere*, 81(11), 1437-45.
- Guan, J., Zhang, C., Wang, Y., Guo, Y., Huang, P. y Zhao, L. (2016). Simultaneous determination of 12 pharmaceuticals in water samples by ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction coupled with ultra-high performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.*, 408, 8099-9109.
- Guzel, E., Cevik, F. y Daglioglu, N. (2018). Determination of pharmaceutical active compounds in Ceyhan River, Turkey: Seasonal, spatial variations and environmental risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1-16.
- Huebner, M., Weber, E., Niessner, R., Boujday, S. y Knopp, D. (2015). Rapid analysis of diclofenac in freshwater and wastewater by monoclonal antibody-based highly sensitive ELISA. *Anal. Bioanal. Chem.*, 407, 8873-8882.
- Instituto Mexicano del Seguro Social. (2019). *Compra consolidada 2016-2017 y 2017-2018*. México: IMSS. Recuperado <http://www.imss.gob.mx/compraconsolidada>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). Estadísticas a propósito de la industria farmacéutica y sus proveedores. Aguascalientes: INEGI.
- Jelic, A., Gros, M., Petrovic, M., Ginebreda, A. y Barceló, D. (2012). Occurrence and elimination of pharmaceuticals during conventional wastewater treatment. En H., Guasch, A., Ginebreda, A., Geislinger (eds.) (p. 270). *Emerging and priority pollutants in rivers*. Berlín: Springer.
- Khan, A., Shams, D. F., Khan, W., Ijaz, A., Qasim, M., Saad, M., Hafeez, A., Baig, S. A. y Ahmed, N. (2018). Prevalence of selected pharmaceuticals in surface water receiving untreated sewage in northwest Pakistan. *Environ. Monit. Assess.*, 190, 324.
- Kristensen, D. M., Desdoits-Lethimonier, C., Mackey, A. L., Dalgaard, M. D., De Masi, F., Munkbøl, C. H. ... y Jégou, B. (2018). Ibuprofen alters human testicular physiology to produce a state of compensated hypogonadism. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 23, 115(4), E715-E724.
- Lonappan, L., Brar, S. K., Das, R. K., Verma, M. y Surampalli, R. Y. (2016). Diclofenac and its transformation products: Environmental occurrence and toxicity-A review. *Environ Int.*, 96, 127-138.
- Margel, D., Fleshner, N. E. (2011). Oral contraceptive use is associated with prostate cancer: an ecological study. *BMJ open*, 1(2), e000311.
- Palacios-Rosas y E., Castro-Pastrana, L. I. (2019) Pharmaceuticals Reaching the Environment: Concepts, Evidence, and Concerns. En L., Gómez-Oliván L. (ed.) *Ecopharmacovigilance: Multidisciplinary Approaches to Environmental Safety of Medicines* (pp. 21-42). Springer International Publishing AG.
- Patrolecco, L., Ademollo, N., Grenni, P., Tolomei, A., Barra-Caracciolo, A. y Capri, S. (2013). Simultaneous determination of human pharmaceuticals in water samples by solid phase extraction and HPLC with UV-fluorescence detection. *Microchem J.*, 107, 165-171.
- Pérez-Alvarez, I., Islas-Flores, H., Gómez-Oliván, L. M., Barceló, D., López De Alda, M., Pérez-Solsona, S. ... Galar-Martínez, M. (2018). Determination of metals and pharmaceutical compounds released in hospital wastewater from Toluca, Mexico, and evaluation of their toxic impact. *Environ Pollut.*, 240, 330-341.
- PROFECO. (2010). Sondeo en línea sobre hábitos de consumo de medicamentos. México: Procuraduría Federal del Consumidor.
- Ramírez-Sánchez, I. M., Martínez-Austria, P., Quiroz-Alfaro, M. A. y Bandala, E. R. (2015). Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. *Tecnol. Cienc. Agua*, 6(5), 31-42.
- Ramírez-Sánchez, I. M., Martínez-Austria, P., Quiroz-Alfaro, M. A. y Bandala, E. R. (2015). Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. *Tecnol Cienc Agua* 6(5), 31-42.
- Rivera-Jaimes, J. A., Postigo, C., Melgoza-Alemán, R. Ma., Aceña, J., Barceló, D. y López de Aldam. (2018). Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment. *Sci Total Environ.*, 613-614; 1263-1274.
- Shanmugam, G., Sampath, S., Selvaraj, K., Larsson, D. G. J. y Ramaswamy, B. (2014). Non-steroidal anti-inflammatory drugs in India rivers. *Environ Sci Pollut Res*, 21, 921-931.
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C. y Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley. *Water Res.*, 42(8-9), 2124-34.
- Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos A. C. (SINGREM) (2014). Casos de éxito. Ponencia en la XXIII Convención de la Industria Farmacéutica. México.
- Stasinakis, A., Mermigka, S., Samaras, V., Farmaki, E. y Thomaidis, N. (2011). Occurrence of endocrine disruptors and selected pharmaceuticals in Aisonas River (Greece) and environmental risk assessment using hazard indexes. *Environ Sci Pollut. Res.*, 19, 1574-1583.
- Togola, A. y Budzinski, H. (2007). Analytical development for analysis of pharmaceuticals in water samples by SPE and GC-MS. *Anal Bioanal. Chem.*, 388, 627-635.
- Wiegand, T. J., Verneti, C. M., VanDeVoort, J. T., et al. (2017). Nonsteroidal Anti-inflammatory drug (NSAID) toxicity. *Medscape*.
- Wongrakpanich, S., Wongrakpanich, A., Melhado, K. y Rangaswami, J. (2018). A comprehensive review of non-steroidal anti-inflammatory drug use in the elderly. *Aging. Dis.*, 9(1), 143-150.
- Zhao, J., Ying, G., Liu, Y., Chen, F., Yang, J., Wang, L., Yang, X., ... St. J. Warne, M. (2010). Occurrence and a screening-level risk assessment of human pharmaceuticals in the pearl river system, South China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29, 1377-1384.

► BTEX in water: advances and perspectives for its treatment



# EN AGUA:

avances y perspectivas para su tratamiento

Por: Ana Karen Cordova Estrada · René Alejandro Lara Díaz · Felipe Cordova Lozano

## RESUMEN

En los últimos años se ha tenido un particular interés en el tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos y en específico, por una mezcla llamada BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), un contaminante que se encuentra comúnmente en el agua, ya sea por descargas o derrames asociados a actividades de la industria petroquímica. Estos contaminantes son resistentes a los tratamientos convencionales de agua, lo que incrementa el riesgo de utilizar los cuerpos de agua contaminados para uso y consumo humano. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica considera al BTEX como contaminantes prioritarios debido a su toxicidad e impone límites máximos permisibles muy estrictos al igual que los establecidos por la normatividad mexicana. En este artículo se realiza una revisión de las fuentes comunes de BTEX en agua y se presenta un comparativo de la normatividad internacional pertinente, así como un análisis de los tratamientos empleados en la actualidad resaltando la aplicación de la nanotecnología para su optimización.

## PALABRAS CLAVE:

**BTEX · Tratamiento de agua · Nanotecnología**

## ABSTRACT

In recent years there has been an interest in the treatment of water contaminated with hydrocarbons and specifically by a mixture called BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylene), which are pollutants that are common-

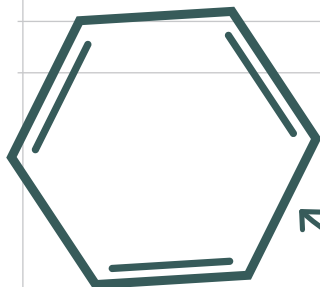


**LA AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA CONSIDERA AL BTEX COMO CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEBIDO A SU TOXICIDAD.**

ly found in water either by discharges or spills associated with activities of the petrochemical industry. These pollutants are resistant to conventional water treatments, which increases the risk of using these contaminated water bodies for human use and consumption. The Environmental Protection Agency of the United States of America considers BTEX as priority pollutants due to its toxicity and imposes very strict maximum permissible limits, as well as those established by Mexican regulations. This article is based on a review of the common sources of BTEX in water and presents a comparison of the relevant international regulations, as well as an analysis of the treatments currently used, highlighting the application of nanotechnology for its optimization.

## KEY WORDS:

**BTEX · Water treatment · Nanotechnology**



# Benceno

## INTRODUCCIÓN

Las actividades económicas y sociales de la población y su propia sobrevivencia dependen de la disponibilidad y calidad del capital natural, constituido por el suelo, aire, agua y los ecosistemas. La calidad, disponibilidad y condiciones de acceso a estos recursos influyen en la competitividad y productividad de los sectores que los utilizan, cuyo desempeño impacta, a su vez, cualitativa y cuantitativamente en éstos (PROMARNAT, 2013). El crecimiento de la actividad industrial en las últimas décadas ha contribuido en gran medida a la contaminación del medio ambiente con metales pesados, sustancias orgánicas e hidrocarburos, los cuales representan una amenaza para la salud pública aun cuando ocurren en bajas concentraciones (Belayachi *et al.*, 2015).

Los hidrocarburos son compuestos de carbono e hidrógeno que se han convertido en una importante fuente de energía en este siglo. Su uso constante y el crecimiento poblacional e industrial han aumentado la amenaza al medio ambiente, y la contaminación por éstos tiene implicaciones de gran alcance, tanto para los ecosistemas terrestres y acuáticos como para la atmósfera. Esta contaminación ha sido generada por derrames en los océanos, fugas en las tuberías de transporte y actividades de explora-

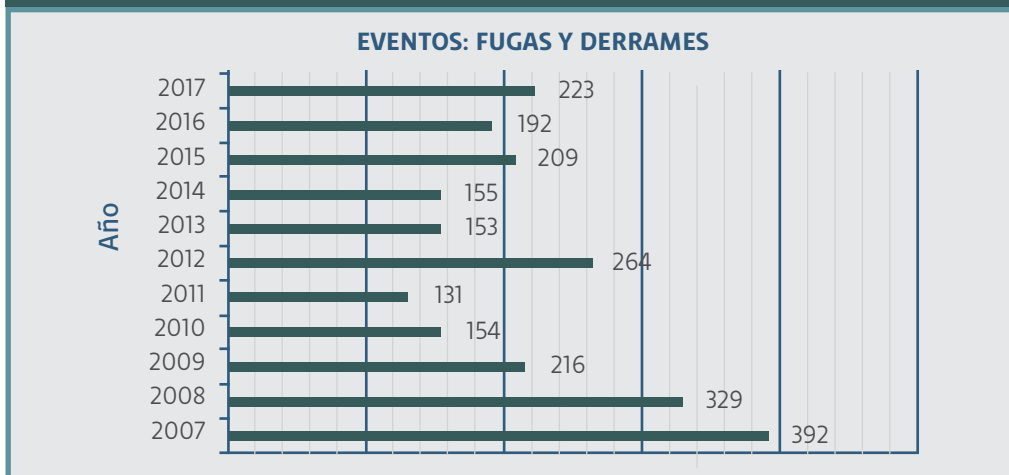
**CADA AÑO, ALREDEDOR DE 35 millones DE BARRILES DE PETRÓLEO SON TRANSPORTADOS EN TODO EL MUNDO A TRAVÉS DE LOS OCÉANOS, LO QUE HACE AL MEDIO ACUÁTICO VULNERABLE A LA CONTAMINACIÓN.**

ción, producción, refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos, los cuales amenazan la calidad de vida de los ecosistemas y la población (Banerjee *et al.*, 2016).

Cada año, alrededor de 35 millones de barriles de petróleo son transportados en todo el mundo a través de los océanos, lo que hace al medio acuático vulnerable a la contaminación (Macaulay, 2015). En la figura 1, se reporta el número de eventos causados por fugas y derrames de hidrocarburos en el país para el periodo 2007 a 2017 por Petróleos Mexicanos (PEMEX), donde se muestra que el 2007 fue el año con mayor número de eventos, así como el incremento sustancial a casi un evento por día en 2017, exentando los eventos ocurridos por tomas clandestinas (PEMEX, 2017a). Otra preocupación

LOS HIDROCARBUROS SON COMPUESTOS DE CARBONO E HIDRÓGENO QUE SE HAN CONVERTIDO EN UNA IMPORTANTE FUENTE DE ENERGÍA EN ESTE SIGLO.

**Figura 1. Número de fugas y derrames de hidrocarburos ocurridos en México durante el período 2007-2017.**



Elaboración propia con datos de PEMEX 2017a.

es la contaminación del suelo por hidrocarburos, debido a que provoca la contaminación del agua subterránea por infiltraciones (Thapa, Kumar y Ghimire, 2012). Tales incidentes de contaminación, tanto en el suelo como en el agua, se han vuelto muy frecuentes actualmente.

Alrededor del mundo, la contaminación por la industria petroquímica ha causado efectos adversos en los ecosistemas. Por ejemplo, el derrame de petróleo ocurrido en 2010 en el Mar Árabe, cerca de la costa de Mumbai, India, dejó más de 2 km<sup>2</sup> de vastas áreas de mar contaminado (Banerjee *et al.*, 2016). En 2014, en el río Sela en Sunderbans (Bangladesh), se derramaron 350 toneladas de petróleo por más de 70 km<sup>2</sup>, amenazando el bosque de manglares de Sunderbans (Banerjee *et al.*, 2016).

En México, quienes realizan actividades industriales, comerciales o de servicios, consideradas altamente riesgosas, presentan un estudio de riesgo ambiental (ERA), cuyo objetivo es «evaluar los riesgos del manejo de materiales peligrosos, anticipando la posibilidad de liberaciones accidentales de sustancias químicas peligrosas, de manera tal que éstas puedan prevenirse o mitigarse». Para el periodo comprendido entre 1992 y 2015, el sector que ingre-

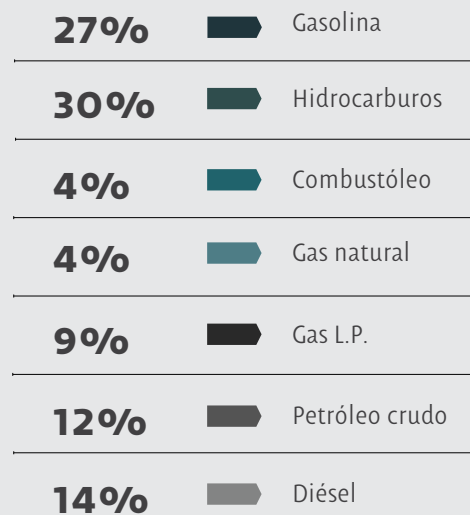
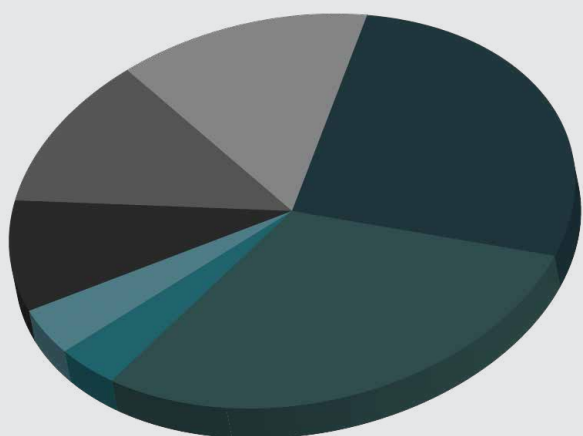
só el mayor número de ERAs fue el petrolero y sus derivados (2,948 estudios; 28.4% del total de ERAs presentadas). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 2016 reportó que hubo 4,078 sitios contaminados por emergencias ambientales, de este total, PEMEX tuvo el mayor porcentaje de responsabilidad con 2,743 sitios (67.3%), seguido de los transportistas (25.5%). La misma SEMARNAT reportó los contaminantes involucrados en estas emergencias ambientales para el periodo 2008-2015, donde los hidrocarburos ocupan el mayor porcentaje (30%), seguidos de la gasolina (27%), siendo el combustóleo el de menor impacto (4%) (SEMARNAT, 2016). En la Figura 2, se observa que tan sólo entre los hidrocarburos y la gasolina se obtiene el mayor porcentaje de contaminantes involucrados (57%).

Debido a los derrames de hidrocarburos sufridos en los últimos años, se ha generado una preocupación para su eliminación o tratamiento en el agua. Los hidrocarburos derramados en el medio acuático están sujetos a muchos procesos que afectan su transporte, destino e impacto al medio ambiente tales como la fotólisis, oxidación, partición, biodegradación y adsorción, entre otros (Saeed y Al-Mutairi, 1999).




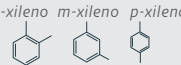


**EN MÉXICO, EXISTE UNA AMPLIA VARIEDAD DE INDUSTRIAS QUE UTILIZAN LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS COMO MATERIA PRIMA Y SE ESTIMA QUE MÁS DEL 90% DE LOS DESECHOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES QUE SE GENERAN SE VIERTEN DIRECTAMENTE AL SISTEMA DE DRENAJE SIN TRATAMIENTO PREVIO.**

**Figura 2. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales entre 2008-2015 en México (SEMARNAT, 2016).**



**Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los compuestos BTEX a 25°C**

Compuesto	Fórmula	Estructura	Masa molecular M (g/mol)	Solubilidad S (g/cm <sup>3</sup> )	Presión de vapor P (Pa)	Log K <sup>ow</sup>
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>		78.1	1780	12700	2.13
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>		92.1	515	3800	2.69
Etilbenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		106.2	160	1270	3.15
Xilenos	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	 <i>o-xileno</i> <i>m-xileno</i> <i>p-xileno</i>	106.2	185	1170	3.15

Elaboración con información de Mitra y Roy (2011); Kharisov, *et al.* (2014); Chesnaux (2008).

Saeed y Al-Mutairi (1999) estudiaron la composición química de la fracción soluble en agua de mar de la gasolina regular y de alto octanaje, y encontraron que los compuestos aromáticos, en particular el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) predominan en la fracción disuelta de los compuestos orgánicos volátiles estudiados (COV). De acuerdo a estos autores, cuando la gasolina está en contacto con el agua, la fracción BTEX representa hasta el 88% de los componentes de la gasolina que se encuentran solubles en agua.

Los BTEX es –entonces– una mezcla de compuestos monoaromáticos y contaminantes provenientes de derrames de gasolinas, tanques de almacenamiento con fugas, tuberías de transferencia, así como por descargas de efluentes industriales, representando una amenaza ambiental cuando se liberan al aire, suelo y cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Aivalioti *et al.*, 2012; Fayemiwo *et al.*, 2017). Estos compuestos se han encontrado con mayor frecuencia en el agua, en una variedad de fuentes como: en los desechos de las industrias petroquímicas, desechos domésticos, gasolineras, así como en plumas de agua subterránea próximas a derrames (El-Naas *et al.*, 2014). En consecuencia, los BTEX se han identificado en agua

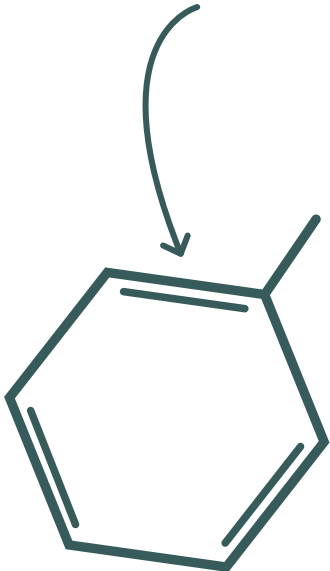
potable, cuyo consumo incrementa el riesgo de padecer enfermedades crónicas como el cáncer cuando sus concentraciones exceden los límites máximos permisibles (LMP) (Mehlman, 1992; Zhang *et al.*, 2012).

Esta revisión muestra la situación actual del BTEX como contaminante alrededor del mundo, tomando en cuenta su normativa y los trabajos que se han realizado en los últimos años para su eliminación del medio ambiente, así como la migración a las nuevas tecnologías como futuras oportunidades para su aplicación.

#### ● Propiedades del BTEX, toxicidad y su presencia en agua

Los BTEX son compuestos orgánicos volátiles formados por un anillo monoaromático que, debido a su polaridad y características muy solubles, son contaminantes del agua, suelo y aire. Cantidades significativas de estos contaminantes entran al agua durante la extracción y refinación del petróleo y derivados empleados para la producción de pinturas, adhesivos, tintas y caucho, entre muchos otros (Castillo *et al.*, 1998). La tabla 1 resume las propiedades físicas y químicas relevantes del BTEX a una temperatura de 25°C, la solubilidad del BTEX en agua se puede observar que es relativamente

## Tolueno





### LOS COMPUESTOS BTEX ESTÁN AMPLIAMENTE DISTRIBUIDOS EN EL MEDIO AMBIENTE DEBIDO A PROCESOS NATURALES Y SINTÉTICOS.

alta, por ejemplo, para benceno se observa un valor de  $1780 \text{ g/cm}^3$ , lo que indica que se solubiliza rápidamente en agua y sus valores del coeficiente de partición octanol-agua ( $K_{ow}$ ) son bajos; lo que muestra que estos compuestos químicos, debido a sus propiedades fisicoquímicas, tienden a disolverse en la fase acuosa o evaporarse dado su naturaleza hidrófila. Estas propiedades les permiten transportarse a largas distancias o adsorberse en el suelo alcanzando las aguas subterráneas. Los BTEX representan hasta el 80% del total de las emisiones de los compuestos volátiles (COV) en plantas petroquímicas (Fatehifar *et al.*, 2008) y hasta el 59% (peso/peso) de los contaminantes de la gasolina, donde el 31% corresponde al m-xileno, seguido del tolueno (26%); siendo los otros elementos menos significativos (ver figura 3).

#### ● Reportes de BTEX en agua

Con más frecuencia se han detectado concentraciones relevantes de BTEX alrededor del mundo (Daifullah y Girgis, 2003). Tal es el caso en el condado de Weld, Colorado, donde los operadores de la Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Colorado (COGCC, por sus siglas en inglés) reportaron en 2010 y 2011, 77 derrames superficiales que impacta-

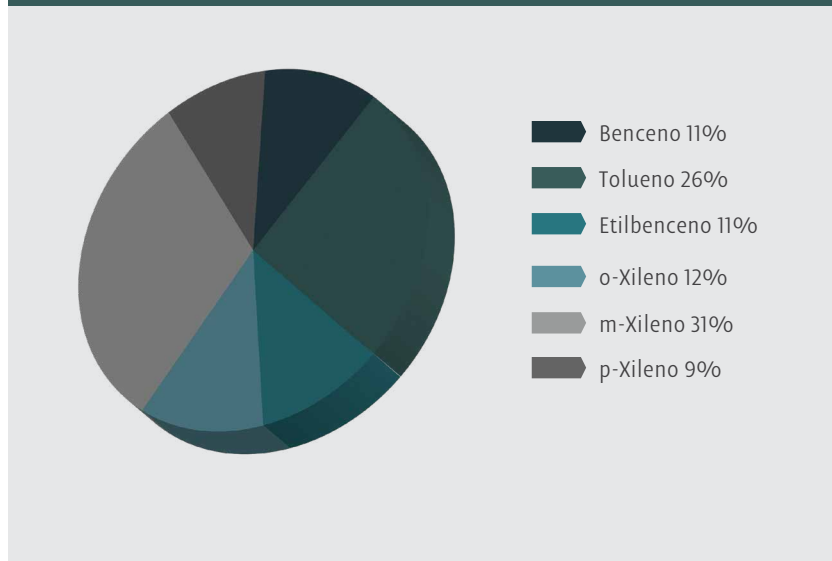
ron las aguas subterráneas. En las muestras de agua tomadas se encontraron BTEX en concentraciones que excedían los límites máximos permisibles establecidos por la US EPA en un 90% para benceno, 30% para tolueno, 2% para etilbenceno y 8% para xilenos (Gross *et al.*, 2013). En Bolivia, González-Alonso *et al.* (2010), analizaron la calidad de 42 cuerpos de agua cercanos a campos petrolíferos y hallaron BTEX en concentraciones por arriba de los límites máximos permitidos por la normativa boliviana. Esto los llevó a observar que los cuerpos de agua ubicados en un radio de 30 km alrededor de campos de extracción de petróleo padecen de contaminación por BTEX.

En México, existe una amplia variedad de industrias que utilizan los hidrocarburos aromáticos como materia prima y se estima que más del 90% de los desechos líquidos industriales que se generan se vierten directamente al sistema de drenaje sin tratamiento previo (Soto *et al.*, 2000).



**EL BENCENO ES CONSIDERADO COMO EL COMPUESTO MÁS PELIGROSO DE LA MEZCLA BTEX, Y ESTÁ CATALOGADO COMO CARCINÓGENO Y GENOTÓXICO DE CATEGORÍA 1.**

**Figura 3. Porcentaje (peso/peso) de los componentes BTEX en la gasolina.**



Elaboración con datos de Mitra y Roy (2011).



**EN MÉXICO  
LA COMISIÓN  
NACIONAL DEL  
AGUA (CONAGUA)  
REPORTA QUE  
EL 41.72% DE  
LOS CUERPOS DE  
AGUA EN 2018  
TENÍAN LÍMITES  
ACEPTABLES DE  
CALIDAD DE AGUA  
(BUENA CALIDAD).**

Asimismo, en México, la mayor parte de las actividades de la industria petroquímica están a cargo de PEMEX, quien ha informado que los impactos ambientales a nivel local continúan siendo materialmente consistentes de un año a otro; afectando principalmente aspectos como el uso del agua, descarga de aguas residuales, derrames, gestión de residuos y pasivos ambientales, lo que continúa siendo parte fundamental para el desempeño ambiental (PEMEX, 2017b). Aunque esta empresa es la encargada de la exploración, explotación y refinación del petróleo, no es responsable del 100% de los derrames de hidrocarburos y la contaminación de cuerpos de agua (Soto *et al.*, 2000). En el estado de Puebla se ha reportado que debido al robo o mal uso de los combustibles han ocurrido derrames en canales de agua que se utilizan para la agricultura, afectando y poniendo en riesgo a la sociedad mexicana que consume estos productos (Cavazos-Arroyo *et al.*, 2014).

#### ● Toxicidad y normatividad BTEX

Los compuestos BTEX están ampliamente distribuidos en el medio ambiente debido a procesos naturales y sintéticos. No obstante, las sustancias producidas a través de las actividades humanas son de mayor preocupación por su toxicidad y cantidad eliminada al ambiente (Buswell, 2001). Los efectos a la salud producidos por BTEX son conocidos desde hace varias décadas. Las vías de exposición a estos compuestos generan severos efectos negativos para la salud que pueden ocurrir por ingestión de agua contaminada o por inhalación, causando efectos negativos que incluyen cáncer, lesiones hepáticas e irritación de órganos (OHD, 1994). Mitra y Roy (2011) informaron que la exposición al BTEX durante un corto periodo de tiempo produce irritación de piel y problemas en el sistema nervioso por inhalación. Al ser los BTEX contaminantes prioritarios de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, por sus siglas en inglés), su tratamiento es fundamental dado que si no son tratados aumenta el riesgo de enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada con BTEX (Abumaizar *et al.*, 1998).

Resulta de suma importancia conocer de forma general la toxicidad del BTEX, ya que de-

## EL COMPLEJO PETROQUÍMICO CANGREJERA

# en 2016

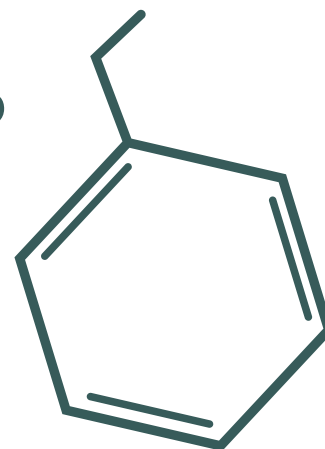
**REPORTÓ QUE PRODUJO 47 MIL TONELADAS MÉTRICAS (TM) DE BENCENO, 87 MIL TM DE TOLUENO, 38 MIL TM DE ETILBENCENO Y 98 MIL TM DE XILENOS; GENERANDO EN TOTAL 270 MIL TM DE BTEX SÓLO PARA ESTE COMPLEJO .**

bido a sus propiedades fisicoquímicas éstos tienen la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y producir daño orgánico cerebral por su acción neurotóxica (Spiker y Morris, 2001; Saeed y Al-Mutairi, 1999). Al consultar la publicación de ATSDR (2007), en el apartado tres referido a «Health Effects», se especifica que «las dosis orales letales para humanos se han estimado en 10 ml (125 mg / kg) para una persona de 70 kg». El benceno es considerado como el compuesto más peligroso de la mezcla BTEX, y está catalogado como carcinógeno y genotóxico de categoría 1 (Glascoe *et al.*, 2014). En 1948, el Instituto Americano del Petróleo, declaró que «generalmente se considera que la única concentración absolutamente segura para el benceno es cero» (API, 1948).

La exposición diaria al BTEX juega un rol primordial en cuanto a su efecto a la salud pública. Las regulaciones establecidas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos de Norteamérica (OSHA, 1999), limitan la exposición por inhalación laboral a benceno a un máximo de 1 parte por millón (ppm) en promedio durante una jornada laboral de ocho horas. En cuanto a México existe la NOM-047-SSA1-1993 que establece «los límites biológicos máximos permisibles del tipo de hidrocarburos aromáticos, para valorar el riesgo a que pueden estar expuestos los trabajadores que laboran con estas sustancias y los efectos que generan a la salud».

El complejo petroquímico Cangrejera (Coatzacoalcos, Veracruz) en 2016 reportó que produjo 47 mil toneladas métricas (Tm) de benceno, 87 mil Tm de tolueno, 38 mil Tm de etilbenceno y 98 mil Tm de xile-

## Etilbenceno



**Tabla 2. Límites máximos permisibles para BTEX en agua potable por distintas agencias regulatorias internacionales.**

Agencias regulatorias	Parámetros (ppm)	Benceno (ppm)	Tolueno (ppm)	Etilbenceno (ppm)	Xilenos (ppm)
ADWG (2011)		0.001	0.025	0.003	0.02
OMS (2001)		0.01	0.7	0.3	0.5
US EPA (1994)		0.005	1.0	0.7	10.0
MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994 (2000)		0.01	0.7	0.3	0.5

(NHMRC, 2011; WHO, 2011; US EPA, 1994; MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994).

nos; generando en total 270 mil Tm de BTEX (PEMEX, 2017c). En un estudio publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en Salamanca, Guanajuato, se encontró que las concentraciones en aire a las que se expone a la sociedad en un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros de industrias (que usan BTEX) se encontraron valores de 0.0011 partes por mil millones en volumen (ppbv) para benceno y 0.0068 ppbv para tolueno. Por lo que los autores concluyen que el compuesto benceno, aun a bajas concentraciones, es cancerígeno, por lo que implica un riesgo a la sociedad (INECC, 2017).

Con base en lo anterior, resulta necesario identificar, evaluar y controlar la exposición a estos agentes tóxicos, determinando primeramente su concentración en el lugar de trabajo, así como establecer los criterios sanitarios para proteger la salud de la población laboral. Existen otras agencias como la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) y la Agencia de Protección Ambiental (US EPA), quienes han publicado metodologías de análisis y los límites de concentración ambientales para BTEX.

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece los límites para «Agua para uso y consumo humano», la cual no regulaba los BTEX. En el 2000 se hizo una modificación de la norma donde se incluye a los BTEX como

contaminantes y se establecen límites máximos permisibles (LMP), los cuales son competitivos frente a otros organismos internacionales, tal como se muestra en la tabla 2. Esto evidencia una comparativa de los LMP para agua potable establecidos por algunas agencias regulatorias en el mundo; siendo la Australian Drinking Water Guidelines (ADWG) la más exigente (NHMRC, 2011). La US EPA reporta como límites máximos permisibles para BTEX en agua potable 0.005 ppm para benceno, 1.0 ppm para tolueno, 0.7 ppm para etilbenceno y 10 ppm para xilenos, mientras que la norma mexicana MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994 reporta 0.01, 0.7, 0.3 y 0.5 ppm respectivamente, siendo la normativa mexicana más estricta para tolueno, etilbenceno y xilenos, pero más laxa para benceno (MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994).

En Estados Unidos, por ejemplo, más del 90% de sus fuentes de agua cumplen con las normativas establecidas por la US EPA, generando agua de «buena calidad» (Beauvais, 2016). En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reporta que el 41.72% de los cuerpos de agua en 2018 tenían límites aceptables de calidad de agua (buena calidad); el resto de los sitios obtuvo una calificación que varió de buena calidad a fuertemente contaminada (CONAGUA, 2017). Por lo que hace falta que se realicen más monitoreos con parámetros que sirvan de indicadores de contaminación como los BTEX y se continúe trabajando en el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de agua.



**EN EL 2000 SE HIZO UNA MODIFICACIÓN DE LA NORMA DONDE SE INCLUYE A LOS BTEX COMO CONTAMINANTES Y SE ESTABLECEN LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES.**



## Xileno

Como se mencionó previamente, la transferencia del BTEX no sólo se da a través de derrames en ríos, lagos y mares, también puede ser influenciada por las infiltraciones o transferencia a suelos. Para esto, México cuenta con la Norma Oficial NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que establece los LMP del BTEX en suelo. Al revisar el contenido de la Norma Oficial NOM-138 puede leerse que los límites máximos permisibles para suelos contaminados con BTEX son 6, 40, 10 y 40 mg/kg base seca de suelo para benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, respectivamente. Lo que permite garantizar menos riesgos de contaminación al agua subterránea por infiltraciones.

Desde hace algunos años México adquirió compromisos a nivel nacional e internacional que, en general, consisten en revertir y tratar los problemas de contaminación principalmente en agua, suelo y aire, generados por el progreso tecnológico y las actividades industriales. A través de la implementación del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT) 2013-2018; se estableció en el quinto objetivo «detener y revertir la pérdida de capital natural y la contaminación del agua, aire y suelo». Su propósito es fortalecer la verificación del cumplimiento de la normatividad ambiental, así como el fortalecimiento a la gestión en la remediación de sitios contaminados y mejorar la calidad del agua en las cuencas y acuíferos del país, mediante estrategias que incluyan el desarrollo y actualización de los instrumentos normativos y de fomento en específico a la extracción de hidrocarburos en el mar, así como en sitios contaminados por hidrocarburos. La implementación de estos compromisos debe fortalecer a futuro los programas para la protección del medio ambiente que eleven la competitividad en materia de calidad de agua y al mismo tiempo reduzcan el impacto a los cuerpos de agua (PROMARNAT, 2013).

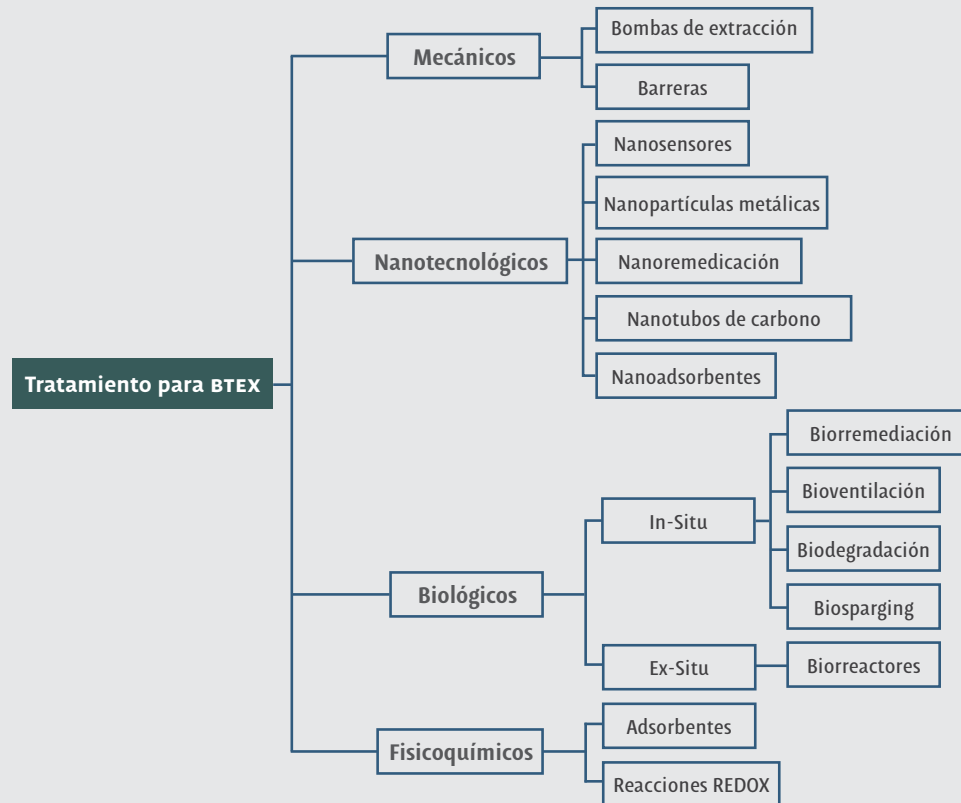
Existe una necesidad urgente de controlar la contaminación por BTEX bajo una gestión sostenible a través de técnicas que sean rentables, eficientes y sostenibles (El-Ramady *et al.*, 2017).

### ● Técnicas para el tratamiento de BTEX

Los procesos de remediación de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos se habían enfocado a los hidrocarburos poliaromáticos (HAP) que se refieren a las fracciones de petróleo pesado. Estos contaminantes afectan al ambiente notablemente (Bojes y Pope, 2007; Romo-Gómez *et al.*, 2010). Sin embargo, los compuestos BTEX son más abundantes que los HAP en el ambiente debido a que se usan con mayor frecuencia en las industrias (Fayemiwo *et al.*, 2017).

A lo largo del tiempo se han buscado métodos de tratamiento que sean más eficientes, menos costosos y más amigables con el ambiente para el BTEX. En la búsqueda de nuevos métodos para el tratamiento de agua y suelo contaminados con BTEX se ha observado que la combinación de los métodos convencionales con nuevas tecnologías ha producido tratamientos más rápidos y eficientes. Existen muchos enfoques que pueden adoptarse en el proceso del tratamiento de la contaminación del BTEX. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas, y su uso depende de distintas variables como grado de contaminación, tiempo de contacto, carga del contaminante, costo y eficiencia. Los métodos de tratamiento comúnmente usados pueden ser mecánicos, fisicoquímicos, biológicos o nanotecnológicos como tecnología emergente. Otras tecnologías comunes también utilizadas son la evaporación, el enterramiento, la dispersión y el lavado. A menudo estas últimas técnicas conducen a una descomposición incompleta de los contaminantes. En la figura 4 se muestra una recopilación general de los métodos empleados actualmente para el tratamiento de BTEX. Los métodos llamados «mecánicos» se refieren al uso de equipos para responder en un tiempo corto de uno a cinco días ante una emergencia ambiental, sin embargo, requieren de un método secundario (biológico o fisicoquímico) para eliminar por completo el BTEX. Un ejemplo de ello es el uso de bombas cuyo objetivo es extraer el BTEX en acuíferos profundos has-

Figura 4. Métodos para tratamiento de BTEX en agua.



Elaboración con información de Das y Chandran (2011).

ta dejar una película delgada donde posteriormente se bombea oxígeno para el desarrollo de organismos biológicos para su descomposición (SCT, 2002). Las barreras se utilizan habitualmente para rodear y contener el derrame de BTEX en agua, con el fin de evitar que se desvíe y se extienda por el acuífero, así como recolectar el BTEX mediante una bomba hacia un punto específico (ITOPF, 2014). El aprovechamiento de la efectividad de cada método dependerá de las condiciones del lugar y de la concentración, entre otros factores. En el siguiente apartado se discutirá el uso de los tratamientos biológicos y nanotecnológicos para BTEX en agua.

#### ● Métodos biológicos para el tratamiento de BTEX

El uso de los microorganismos son, en particular, los agentes dominantes de la degradación de hidrocarburos en el medio ambiente (Röling *et al.*, 2002). Existen diferentes métodos biológicos para el tratamiento de BTEX en agua y su aplicación consiste en degradar estos contaminantes empleando microorganismos que tienen la capacidad de utilizar hidrocarburos como fuente de carbón y/o energía en su acti-

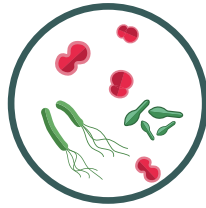
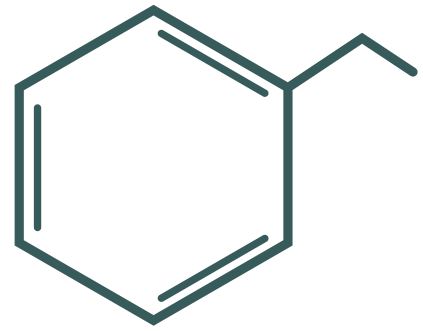
vidad metabólica (Vidali, 2001). Acuña-Askar *et al.* (2003) demostraron que la biodegradación aerobia puede remover hasta el 99% del benceno y el 92% de los xilenos presentes en agua en un lapso de diez días; no obstante, el tiempo necesario para el tratamiento biológico de BTEX es largo. Otro de los métodos más usados para la degradación del BTEX es la biorremediación, dado que es un procedimiento económico y ecológico basado en las capacidades metabólicas de los microorganismos para degradar contaminantes bioquímicamente, una de sus ventajas es que es una técnica *in situ*, posicionándose en una de las mejores (Huang *et al.*, 2013).

La bioaumentación es una estrategia que consiste en agregar organismos degradadores al ambiente afectado, en comparación con la bioestimulación que consta en proporcionar un ambiente favorable para que las bacterias degraden los contaminantes de manera efectiva (Kaplan y Kitts, 2004).

El uso de la bioaumentación para los BTEX se evaluó mediante cinéticas de biodegradación por un consorcio microbiano previamente bioaumentado y aclimatado a gasolina sin plomo. Se encontró que los porcentajes de re-



**LA ELIMINACIÓN DE BTEX DEL AGUA HA SIDO AMPLIAMENTE ESTUDIADA, Y SE HAN APLICADO VARIOS PROCESOS, INCLUYENDO LA BIORREMEDIACIÓN, VOLATILIZACIÓN, OXIDACIÓN Y ADSORCIÓN.**



**EXISTEN DIFERENTES MÉTODOS BIOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE BTEX EN AGUA Y SU APLICACIÓN CONSISTE EN DEGRADAR ESTOS CONTAMINANTES EMPLEANDO MICROORGANISMOS QUE TIENEN LA CAPACIDAD DE UTILIZAR HIDROCARBUROS COMO FUENTE DE CARBÓN Y/O ENERGÍA EN SU ACTIVIDAD METABÓLICA.**

moción estaban entre 95.1-99.5% para benceno, tolueno y etilbenceno, sin embargo, era difícil biodegradar el o-xileno 56.0-89.8% (Acuña *et al.*, 2008). De acuerdo con Lin, *et al.* (2012), quienes estudiaron la degradación de BTEX por medio de perlas de liberación de oxígeno (ORB, por sus siglas en inglés) y perlas de células inmovilizadas de liberación de oxígeno (ORICB, por sus siglas en inglés), en donde a una concentración de BTEX de 120 ppm, se eliminó 67% de benceno y el 81-90% de TEX.

La mayoría de las técnicas en biorremediación son de naturaleza aeróbica, pero se están desarrollando procesos anaeróbicos para ayudar a degradar los contaminantes en áreas con déficit de oxígeno (Franchi *et al.*, 2016).

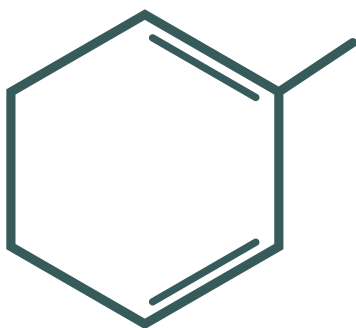
Otra de las ventajas en el uso de la biorremediación es que garantiza que los desechos que se puedan generar se incorporen al medio ambiente. Además, que el costo es menor comparado a los métodos fisicoquímicos

Lei *et al.*, (2010); Franchi *et al.*, (2016). Las limitaciones del uso de la biorremediación se centran en que los hidrocarburos altamente aromáticos son muy resistentes a la degradación microbiana, su tiempo de degradación es de 45 días y, por lo tanto, su velocidad de degradación es lenta; por lo que se continúa con la búsqueda de microorganismos susceptibles a degradar el BTEX. Dado que, su crecimiento debe ser muy específico y controlado, genera otra limitación a su uso (De la Cueva *et al.*, 2016).

En un estudio presentado por Bradley y Chapelle (1995) se usó la biorremediación *in situ* para tratar el BTEX a bajas temperaturas (inferiores a 5°C) en agua subterránea en Alaska en comparación con temperaturas de 20°C o más. Los resultados mostraron que a bajas temperaturas se mineralizaban a 16.3% más rápido que a 20°C, donde se obtuvo una mineralización de 5.1%, por lo que se concluyó que a bajas temperaturas se obtiene una mejor mineralización.

Cunningham *et al.* (2001) estudiaron la biorremediación *in situ* de los compuestos BTEX en Seal Beach, California. En este estudio, los autores usaron un sistema de inyección combinada de nitrato y sulfato en el acuífero contaminado para acelerar la biodegradación de BTEX y compararon sus resultados con el método de la remediación por atenuación natural (RNA), usado convencionalmente para tratar la contaminación de las aguas subterráneas por BTEX. El sistema RNA mostró una desventaja frente a un sistema de inyección acoplado debido a que es lento para biodegradar los BTEX y resultó poco efectivo para biodegradar benceno; por lo que los autores determinaron que el de inyección es más eficiente ya que es capaz de estimular la biodegradación.

También se ha usado la degradación fúngica para la biorremediación del BTEX, usando mecanismos de degradación, elucidación de las vías catabólicas y enzimas aplicadas en el diseño y operación de biosensores (Buswe



ll, 2001). Se ha demostrado que los hongos deuteromicetos pertenecientes a los géneros *Cladophialophora* (CPH) y *Cladosporium* (CS) pueden degradar los BTEX. Sin embargo, estas cepas fúngicas no son capaces de degradar benceno presentando una desventaja en comparación con la biorremediación; en cuanto a tolueno, etilbenceno y xileno fueron capaces de degradarlos completamente (Nikolova y Nenov, 2005).

#### ● Tratamientos no convencionales de BTEX

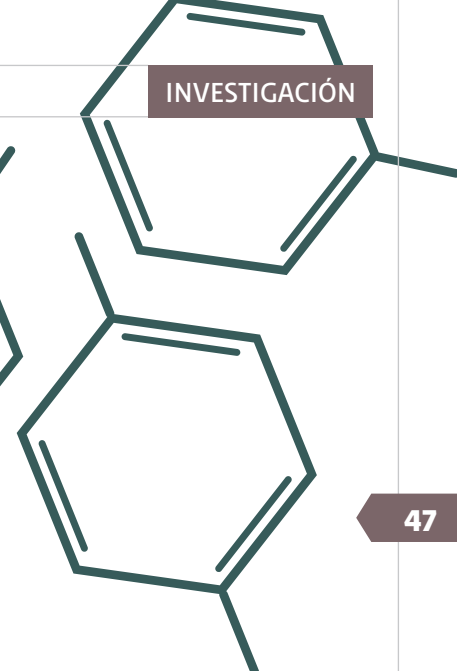
La eliminación de BTEX del agua ha sido ampliamente estudiada, y varios procesos se han aplicado, incluyendo la biorremediación, volatilización, oxidación y adsorción, pero constantemente se buscan nuevos tratamientos basados en las tecnologías emergentes. La nanotecnología proporciona procesos eficientes, modulares y multifuncionales en su naturaleza; además de dar soluciones innovadoras para el tratamiento de agua y en específico de los BTEX (Ingle *et al.*, 2014). Esta tecnología aporta un enfoque alternativo para tratar los problemas de contaminación, usando como base los métodos tradicionales y añadiéndole los beneficios de la nanotecnología. Se podrían caracterizar algunas aplicaciones principales de la nanotecnología, como la detección mediante nanosensores, la prevención de contaminación, la purificación y eliminación de contaminantes mediante nanomateriales, nanopartículas, incluidos los nanotubos de carbono, las nanomembranas, los dendrímeros, los nanoadsorbentes, las zeolitas a nanoescala, las partículas bimetalicas, las enzimas y los óxidos metálicos, entre otros (Kuppusamy *et al.*, 2016; Patil *et al.*, 2016; Kaur *et al.*, 2017). Los nanomateriales se fabrican con características específicas como alta relación de aspecto, reactividad y volumen de poro sintonizable, superficie específica alta (SBET), e interacciones electrostáticas, hidrofílicas e hidrofóbicas, que son útiles en la adsorción, catálisis, sensores y

optoelectrónica (Kunduru *et al.*, 2017). Los procesos con nanotecnología para el tratamiento del agua constituyen desafíos importantes para los métodos existentes.

Dicho lo previo, en 2014 se desarrolló un sensor usando nanotubos de carbono y nanopartículas de oro para la detección de BTEX en agua, el cual pudiera responder inclusive a los LMP establecidos en este caso por US EPA (Cooper *et al.*, 2014). Una de las ventajas del uso de nanosensores versus los convencionales son los límites de detección en agua con BTEX, ya que Cooper *et al.* (2014), reportan que el nanosensor tiene un límite de detección de hasta 0.2 a 0.6 ppm en agua, versus los sensores que reportan que su límite de detección es de 0.5 ppm (Sekharz y Subramaniyam, 2014). Otra de las ventajas es que el ensamblaje de los nanosensores, además de su tamaño, es de resistencia química por ejemplo a la corrosión, así como mayor sensibilidad y optimización; además de que pueden transmitir información en tiempo real por 26 días continuos sin tener resistencia eléctrica. Las resistencias a la deriva no afectaron la sensibilidad de los nanomateriales, que se mantuvieron constantes con el tiempo (Dahman, 2017). Por lo que son una opción relevante para la detección del BTEX en agua frente a los convencionales.

Otra aplicación interesante usando nanomateriales surge de Peerakiathajohn *et al.* (2011), quienes desarrollaron una película delgada de plata (Ag) dopada con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) sensible a la luz visible sobre plástico (PET) para el tratamiento del BTEX, que degradó el 79% con luz visible en un tiempo de 240 minutos. Al-Sabahi *et al.* (2017), usaron ZnO soportado en nanobarras bajo luz visible, donde obtuvieron una degradación de más del 80% del BTEX en agua en un tiempo de 180 minutos.

Otro campo que se ha explorado en los nanomateriales es el uso de nanoadsorbentes, ya que poseen una serie de propiedades físicas y



**LOS NANOCOMPUESTOS TIENEN UNA ALTA POSIBILIDAD DE SER APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES Y PROMETEN SER MÁS EFICIENTES.**

# Etilbenceno Xileno Benceno Tolueno

químicas únicas. Debido a que su área superficial es grande, permite adsorber fuertemente muchas sustancias, incluidos los metales traza y los compuestos orgánicos polares (Khajeh, Laurent y Dastafkan, 2013). Estos nanoadsorbentes pueden tener la característica de recuperarse del agua y regenerarse después de su uso (Thobeka y Sudesh, 2017). Se evaluó la efectividad de la zeolita modificada con surfactante (SMZ) para el BTEX, donde los resultados publicados por Ranck *et al.* (2005), determinaron que es capaz de realizar hasta diez ciclos de sorción/regeneración de SMZ, sin embargo, su capacidad de absorción va disminuyendo.

Por otro lado, las nanopartículas metálicas de hierro (Fe), se han convertido en gran interés en el tratamiento de agua, puesto que permiten eliminar con mayor facilidad los contaminantes. Wang, *et al.*, (2010), destacaron que el magnetismo de las nanopartículas de hierro las hace viables para la remoción de BTEX (por métodos catalíticos) y su fácil manipulación para su recuperación del agua.

Los nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en inglés), son conocidos por su alta capacidad de adsorción, debido a su pequeño tamaño y gran superficie activa. La eliminación de BTEX también se puede dar por medio de CNT de paredes múltiples y de pared simple (MWCNTs y SWCNTs, por sus siglas en inglés), en donde también se presenta que después de adsorberse el BTEX, estos materiales pueden desorberse fácilmente usando altas temperaturas 102°C (Bina *et al.*, 2014).

Otra estrategia prometedora es la nanoremediación, que describe el uso de nanopartículas (NP) o compósitos en el tratamiento de aguas contaminadas, en este caso con BTEX, donde los procesos de nanoremediación generalmente implican reducción, oxidación, sorción o combinación de estos (Bardos *et al.*, 2018). Varias nanopartículas se han utilizado con éxito en nanoremediación, como nanopartículas de hierro (Fe), nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub>, nanopartículas magnéticas, nanopartículas de ferritina, nanopartículas poliméricas y nanopartículas bioactivas (Kaur *et al.*, 2017).

El uso de nanopartículas en el tratamiento de contaminantes es prometedor, sin embargo, su modo de acción debe ser específico, por lo tanto, en los últimos años se ha trabajado en el desarrollo de nanocompuestos (Pandey *et al.*,

2017). Los nanocompuestos tienen una alta posibilidad de ser aplicados para la remoción de contaminantes y prometen ser más eficientes. Tal es el caso reportado, por Su, Lu y Tai, (2016), quienes diseñaron una membrana con nanotubos de carbono/fluoruro de polivinilideno, para la remoción de BTEX en soluciones acuosas para su aplicación en aguas residuales. También se han utilizado nanocompuestos y polímeros para el tratamiento del BTEX (Kharisov, Kharissova y Rasika, 2014).

Pese a que la nanotecnología apunta a ser una herramienta para el tratamiento de agua a futuro, hay escasos reportes acerca de la toxicidad y riesgo para su uso para los BTEX (Fayemiwo *et al.*, 2017). En lo que concierne a México, aún no existe una normativa que regule el uso de los nanomateriales en aplicaciones al medio ambiente y por ende existe una necesidad inmediata de generar una regulación para su uso.

## CONCLUSIONES

Los BTEX se utilizan a nivel mundial en productos de consumo y se liberan al agua, producto de las operaciones de petróleo y gas natural, que están cada vez más cerca de hogares, escuelas y otros lugares de actividad humana, afectando a los mares y ríos, así como fuentes de agua potable y aguas subterráneas. Los continuos esfuerzos han llevado al desarrollo de regulaciones más estrictas y exitosas enfocadas en controlar y reducir los niveles del BTEX en agua. Tal es el caso de la agencia ADWG, quienes han establecido límites muy estrictos para el BTEX. Se deben dirigir esfuerzos para reducir la contaminación por BTEX.

Si bien México está trabajando y creando compromisos a nivel nacional e internacional en materia ambiental, en específico en el sector de agua, con el fin de obtener una mejora en su calidad de agua, se deben seguir evaluando los sitios contaminados a corto y largo plazo; así como reducir el número de eventos de fugas y derrames de hidrocarburos a fuentes de agua.

Respecto a los tratamientos para los BTEX es necesario modernizarlos para crear sistemas integrales que incorporen nuevas tecnologías para mejorar su eficiencia. Los tratamientos de agua presentados en esta revisión son algunos que se utilizan hoy en día; los cuales tienen ventajas y desventajas. La nanotecnología ofrece una estrategia interesante para tratar la

contaminación del agua, en particular con BTEX. Como resultado, el interés en estos materiales ha aumentado significativamente en la última década dando pauta a investigaciones a futuro.

Esta revisión muestra que los BTEX son una problemática ambiental que está afectando a las fuentes de agua continuamente. Los estudios continúan con la búsqueda de nuevas metodologías y aplicaciones que puedan ser más eficientes, a corto tiempo, a menor costo y que no añadan subproductos al medio ambiente después de su tratamiento; presentando una importante línea de investigación para futuras investigaciones.



### **Ana Karen Cordova Estrada**

#### **AUTOR DE CORRESPONDENCIA**

Licenciada en Nanotecnología e Ingeniería Molecular por la Universidad de las Américas Puebla; cuenta con un diplomado en Auditoría Ambiental por la UPAEP. Ha participado en diferentes estancias de investigación nacionales e internacionales y participado en congresos nacionales e internacionales relacionados a su disciplina. Actualmente es estudiante del doctorado en Ciencias del Agua en la UDLAP y es locutor en el programa de Climate Reality UDLAP por Elocuencia 8080. [ana.cordova@udlap.mx](mailto:ana.cordova@udlap.mx)



### **René Alejandro Lara Díaz**

Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con especialidad en Tecnología Química por el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIIICAP) de la Universidad Autónoma de Morelos. Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental por el ITESM, campus Monterrey. Licenciado en Ingeniería Química Industrial por la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Actualmente es decano de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), es vicepresidente general 2018-2020 de la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería (ANFEI), auditor-certificador de Sistemas de Administración Ambiental (ISO-14001), evaluador de programas de ingeniería del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) y fue miembro de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ). [renea.lara@udlap.mx](mailto:renea.lara@udlap.mx)



### **Felipe Cordova Lozano**

Doctor en Química, con especialidad en Química Molecular y Estructural por la Université Joseph Fourier Grenoble, Francia. Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Química por la Universidad de las Américas Puebla, donde actualmente labora como profesor de tiempo completo en el Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, egresado de la Licenciatura en Química Industrial por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. El Dr. Córdoba ha realizado estancias de investigación en instituciones como: Brigham Young University, en Utah y The University of Texas at San Antonio. Ha publicado 14 artículos con arbitraje a nivel internacional, dirigido 17 tesis y participado en congresos nacionales e internacionales relacionados a su disciplina. Actualmente trabaja en la realización de proyectos que utilicen nanomateriales 1D en donde se incluyen nanofibras, nanotubos y nanoalambres para procesos de fotocatalisis. Es profesor de tiempo completo de la UDLAP. [felipe.cordova@udlap.mx](mailto:felipe.cordova@udlap.mx)

## **REFERENCIAS**

- Abumaizar, R. J., Kocher, W. y Smith, E. (1998). Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media. *J Hazard Mater*, 111-126.
- Acuña, K., Villareal, J., Gracia, M., Tijerina, R., Garza, M., Chávez, B., ... Barrera, H. (2008). Cinética de biodegradación de mezclas BTEX-EMTB por medio de un proceso de bioaumentación. *CIENCIA UANL*, IX.
- Acuña-Askar, K., Englande, A., Ramirez-Medrano, A., Coronado-Guardiola, J. y Chavez-Gomez, B. (2003). Evaluation of biomass production in unleaded gasoline and BTEX-fed batch reactors. *Water Science and Technology*, 48(8), 127-133. doi:10.2166/wst.2003.0461
- Aivalioti, M., Pothoulaki, D., Papoulias, P. y Gidaraks, E. (2012). Removal of BTEX, MTBE and TAME from aqueous solutions by adsorption onto raw and thermally treated lignite. *Journal of Hazardous Materials*, 207, 136-146.
- Al-Sabahi, J., Bora, T., Al-Abri, M. y Dutta, J. (2017). Efficient visible light photocatalysis of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) in aqueous solutions using supported zinc oxide nanorods. *PLoS One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189276>
- API. (1948). A toxicological review of benzene. *American Petroleum Institute*.
- ATSDR. (2007). *Toxicological Profile for Benzene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Banerjee, A., Roy, A., Dutta, S. y Mondal, S. (2016). Bioremediation of hydrocarbon- A Review. *International Journal of Advanced Research*, 4(6), 1303-1313. doi:10.21474/IJAR01
- Bardos, P., Merly, C., Kvapil, P. y Koschitzky. (2018). Status of nanoremediation and its potential for future deployment: Risk-benefit and benchmarking appraisals. *Remediation Journal*, 43-56. doi:10.1002/rem.21559
- Beauvais, J. (2016). *EPA Blog*. Recuperado de Moving Forward for America's Drinking Water. <https://blog.epa.gov/2016/04/26/moving-forward-for-americas-drinking-water/>
- Belayachi, A., Bestani, B., Bendraoua, A., Benderdouche, N. y Duclaux, L. (2015). The influence of surface functionalization of activated carbon on dyes and metal ion removal from aqueous media. *Desalination and Water Treatment*, 17557-17569. doi:10.1080/1944399.4.2015.1086701
- Bina, B., Amin, M., Rashidib, A. y Pourzamani, H. (2014). Water and wastewater treatment from BTEX by carbon nanotubes and NanoFe. *Water Resources*, 719-727. doi:10.1134/S0097807814060037
- Bojes, H. K. y Pope, P. G. (2007). Characterization of EPA's 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and associated contaminated soils at oil exploration and production sites in Texas. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 47(3), 288-295. doi:10.1016/j.yrtph.2006.11.007
- Bradley, P. y Chapelle, F. H. (1995). Rapid Toluene Mineralization by Aquifer Microorganisms at Adak, Alaska: Implications for Intrinsic Bioremediation in Cold Environments. *Environ. Sci. Technol.*, 2778-2781. doi:10.1021/es00011a012

- Buswell, J. (2001). Fungal biodegradation of chlorinated monoaromatics and BTEX compounds. En G. Gadd, *Fungi in Bioremediation* (pp. 113-135). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511541780.007
- Castillo, M., Oubiña, A. y Barceló, D. (1998). Evaluation of ELISA kits followed by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry for the determination of organic pollutants in industrial effluents. *Environ. Sci. Technol.*, 32(14), 2180-2184. doi:10.1021/es971042z
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. y Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Impacts and consequences from hydrocarbon spills on agricultural soils in Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 11(4).
- Chesnaux, R. (2008). Analytical closed-form solutions for assessing pumping cycles, times, and costs required for NAPL remediation. *Environmental Geology*, 1381-1388. doi:10.1007/s00254-007-1088-9
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)
- Cooper, S., Myers, M., Chow, E., Hubble, L., Cairney, J., Pejčić, B., . . . Ragu-se, B. (2014). Performance of graphene, carbon nanotube, and gold nanoparticle chemiresistor sensors for the detection of petroleum hydrocarbons in water. *Journal of Nanoparticle Research*. doi:10.1007/s11051-013-2173-5
- Cunningham, J. A., Rahme, H., Hopkins, G. D., Lebron, C. y Reinhard, M. (2001). Enhanced In Situ Bioremediation of BTEX-Contaminated Groundwater by Combined Injection of Nitrate and Sulfate. *Environmental Science & Technology*, 35(8), 1663-1670. doi:10.1021/es001722t
- Dahman, Y. (2017). Chapter 4 - Nanosensors. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*, 67-71. doi:10.1016/B978-0-323-51256-5.00004-6
- Daifullah, A. y Girgis, B. (2003). Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 214(1-3), 181-193. doi:10.1016/S0927-7757(02)00392-8
- Das, N. y Chandran, P. (2011). Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. *Biotechnology Research International*. doi:10.4061/2011/941810
- De la Cueva, S., Rodríguez, C., Cruz, N., Contreras, J. y Miranda, J. (2016). Changes in Bacterial Populations During Bioremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons. *Water Air Soil Pollut*, 1-12. doi:10.1007/s11270-016-2789-z
- El-Naas, M. H., Acio, J. A. y El-Telib, A. (2014). Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and Prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1104-1122. doi:10.1016/j.jece.2014.04.009
- El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Henawy, H., Abdalla, N., Taha, S., Elmahrouk, M., . . . Domokos-Szabolcsy, E. (2017). Environmental Nanoremediation under Changing Climate. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 109-128. doi:10.21608/jenvbs.2017.1550.1009
- Fatehifar, E., Kahforoshan, D., Khazin, L., Soltanmohammadzadeh, J. y Sattar, H. (2008). Estimation of VOC emission from wastewater treatment unit in a petrochemical plant using emission factors. *WSEAS Conferences Cantabria*. Spain.
- Fayemiwo, O. M., Daramola, O. M. y Moothi, K. (2017). BTEX compounds in water-future trends and directions for water. *Water SA*, 43(4), 602-613. doi:10.4314/wsa.v43i4.08
- Franchi, E., Agazzi, G., Rolli, E., Borin, S., Marasco, R., Chiaberge, S. y Barbafieri, M. (2016). Exploiting hydrocarbon-degrader indigenous bacteria for bioremediation and phytoremediation of a multi-contaminated soil. *Chemical Engineering & Technology*, 39(9), 1676-1684. doi:10.1002/ceat.201500573
- Glascoe, V., Alysse, C., Arellano, E., Walter, L., Espejel, I., Villada, M., . . . Arredondo, C. (2014). Emisión de BTEX por las gasolineras, proximidad geográfica y síntomas neurológicos en residentes de Ensenada, Baja California, México. *Ecorfan: Ciencias Naturales y Exactas- Handbook T-11*, 124-139.
- González-Alonso, S., Esteban-Hernández, J., Valcárcel, Y., Hernández-Barrera, V. y Gil de Miguel, A. (2010). Contaminación del agua en fuentes cercanas a campos petrolíferos de Bolivia. *Rev. Panam Salud Pública*, 235-243.
- Gross, S., Heather, J., Banducci, A., Sahmel, J., Panko, J. y Tvermoes, B. (2013). Analysis of BTEX groundwater concentrations from surface spills associated with hydraulic fracturing operations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 424-432. doi:10.1080/10962247.2012.759166
- Huang, L., Xie, J., Lv, B.-y., Shi, X., Liang, F. y Lian, J. (2013). Optimization of nutrient component for diesel oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS. *Marine Pollution Bulletin*, 325-332. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.03.037
- INECC. (2017). *Estudio para determinar la exposición personal a CO, PM2.5 y BTEX, en Salamanca, Guanajuato*. México: SEMARNAT.
- Ingle, A., Seabra, A. B., Duran, N. y Rai, M. (2014). 9 - Nanoremediation: A New and Emerging Technology for the Removal of Toxic Contaminant from Environment. En S. Das, *Microbial Biodegradation and Bioremediation* (pp. 233-250). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-800021-2.00009-1
- ITOPE. (2014). *Uso de barreras en la respuesta a la contaminación por hidrocarburos*. London: ITOPE.
- Kaplan, C. y Kitts, C. (2004). Bacterial succession in a petroleum land treatment unit. *Applied and Environmental Microbiology*, 1777-1786. doi:10.1128/AEM.70.3.1777
- Kaur, J., Pathak, T., Singh, A. y Kumar, K. (2017). Application of Nanotechnology in the Environment Biotechnology. En R. Kumar, A. Sharma, y S. Ahluwalia, *Advances in Environmental Biotechnology* (pp. 155-165). Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-10-4041-2\_9
- Khajeh, M., Laurent, S. y Dastafkan, K. (2013). Nano-adsorbents: Classification, Preparation, and Applications (with Emphasis on Aqueous Media). *Chemical Reviews*, 7728-7768. doi:10.1021/cr400086v
- Kharisov, B., Kharissova, O. y Rasika, H. (2014). Nanocomposites for BTEX removal. En B. Kharisov, O. Kharissova y H. Rasika, *Nanomaterials for Environmental Protection*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118845530
- Kunduru, R., Nazarkovsky, M., Farah, S., Pawar, P., Basu, A. y Domb, A. (2017). 2- Nanotechnology for water purification: Applications of nanotechnology methods in wastewater treatment. En A. M. Alexandru Mihai Grumezescu, *Water Purification* (pp. 33-74). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-804300-4.00002-2
- Kuppasamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkates, K. y Naidu, R. (2016). In-Situ Remediation Approaches for the Management of Contaminated Sites: A Comprehensive Overview. En P. De Voogt, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-20013-2\_1
- Lei, C., Li, C., Dong, S. y Shim, H. (2010). Bioremediation of Water Contaminated With BTEX, TPH and TCE Under Different Environmental Conditions. *Advances in Environmental Geotechnics*. doi:10.1007/978-3-642-04460-1\_95
- Lin, C. W., Wu, C. H., Tang, C. T. y Chang, S. H. (2012). Novel oxygen-releasing immobilized cell beads for bioremediation of BTEX-contaminated water. *Bioresource Technology*, 124, 45-51. doi:10.1016/j.biortech.2012.07.099
- Macaulay, B. (2015). Understanding the behaviour of oil-degrading micro-organisms to enhance the microbial remediation of spilled petroleum. *Appl. Ecol. Environ. Res*, 13(1), 247-262. doi:10.15666/aeer/1301\_247262

- Mehlman, M. (1992). Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oil refining and petrochemical industry: VIII. Health effects of motor fuels: Carcinogenicity of gasoline-Scientific update. *Environmental Research*, 59(1), 238-249. doi:10.1016/S0013-9351(05)80243-9
- Mitra, S. y Roy, P. (2011). BTEX: A serious ground-water contaminant. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5, 394-398. doi:10.3923/rjes.2011.394.398
- MOD-NOM-127-SSA1-1994. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NHMRC. (2011). *Australian Drinking Water Guidelines Paper 6 National Water Quality Management Strategy*. Commonwealth of Australia, Canberra: National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council.
- Nikolova, N. y Nenov, V. (2005). BTEX degradation by fungi. *Water Science & Technology*, 51(11), 87-93. doi:10.2166/wst.2005.0394
- NOM-047-SSA1-1993. (1993). Norma Oficial Mexicana. Límites biológicos máximos permisibles de disolventes orgánicos en el personal ocupacionalmente expuesto.
- NOM-127-SSA1-1994. (1994). NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. (2012). Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
- OHD. (1994). *Health Effects Information - BTEX*. Oregon: Office of Environmental Public Health.
- OSHA, O. (1999). *OSHA standard -29 CFR 1910.1028 (7/1/1999)*. National Library of Medicine, HSDB: Benzene, CARSN: 71-43-2.
- Pandey, N., Shukla, S. y Singh, N. (2017). Water purification by polymer nanocomposites: an overview. *Nanocomposites*, 47-66. doi:10.1080/20550324.2017.1329983
- Patil, S., Shedbalkar, A., Truskewycz, A., Chopade, B. y Ball, A. (2016). Nanoparticles for environmental clean-up: A review of potential risks and emerging solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 10-21. doi:10.1016/j.eti.2015.11.001
- Peerakiathajohn, P., Onreabroy, W., Chawengkijwanich, C. y Chirakorn, S. (2011). Preparation of visible-light-responsive TiO<sub>2</sub> doped Ag thin film on PET plastic for BTEX treatment. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 121-125.
- PEMEX. (2017a). *Anuario estadístico 2017*. MÉXICO: PEMEX. Recuperado de [http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico\\_2017\\_es.pdf](http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico_2017_es.pdf)
- PEMEX. (2017b). *Informe de sustentabilidad 2017*. México.
- PEMEX. (2017c). *Statistical Yearbook 2017*. México: PEMEX. Recuperado de <http://www.pemex.com/en/investors/publications/Documents/STATISTICAL-YEARBOOK-2017.pdf>
- PROMARNAT. (2013). *Plan nacional de desarrollo 2013-2018*. México: SEMARNAT. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/programa-sectorial-de-medio-ambiente-y-recursos-naturales>
- Ranck, M., Bowman, R., Weeber, J., Katz, L. y Sullivan, E. (2005). BTEX removal from produced water using surfactant-modified zeolite. *Journal of Environmental Engineering*, 642-647.
- Röling, F., Milner, M., Jones, D., Lee, K., Daniel, F., Swannell, R. y Head, I. (2002). Robust hydrocarbon degradation and dynamics of bacterial communities during nutrient-enhanced oil spill bioremediation. *Applied and Environmental Microbiology*, 5537-5548. doi:10.1128/AEM.68.11.5537-5548.2002
- Romo-Gómez, C., Monks, S., Pulido-Flores, G. y Gordillo-Martínez, A. (2010). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in superficial water and sediment of lake Tecocomulco, Mexico. *Interciencia*, 905-911.
- Saeed, T. y Al-Mutairi, M. (1999). Chemical composition of the water-soluble fraction of the leaded gasolines in seawater. *Environment International*, 25(1), 117-129. doi:10.1016/S0160-4120(98)00093-2
- SCT. (2002). *Metodología para saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Sekharz, K. y Subramaniyam, K. (2014). Detection of Harmful Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes (BTEX) Vapors using electrochemical gas sensors. *ECS Electrochem. Lett.* doi:10.1149/2.005402eel
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales*. SEMARNAT.
- Soto, E., Mazari, M. y Bojórquez, L. A. (2000). Entidades de la zona metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. *Investigaciones Geográficas-Boletín del Instituto de Geografía UNAM, México*, 60-75.
- Spiker, R. y Morris, G. (2001). Hygiene. Solvents and industrial. En R. Spiker y G. Morris, *Hayes' Principles and Methods of Toxicology* (pp. 552-553). EE. UU.: Taylor and Francis.
- Su, F., Lu, C. y Tai, J. (2016). Separation of benzene, toluene, ethylbenzene and p-Xylene from aqueous solutions by carbon nanotubes/ polyvinylidene fluoride nanocomposite membrane. *Journal of Water Resource and Protection*, 913-928. doi:10.4236/jwarp.2016.810075
- Thapa, B., Kumar, K. y Ghimire, A. (2012). A Review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 164-170.
- Thobeka, P. M. y Sudesh, R. (2017). Investigation of BTEX compounds adsorption onto polystyrenic resin. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, 71-80. doi:10.1016/j.sajce.2017.03.001
- US EPA. (1994). *National primary drinking water standards*. EE. UU.: Office of Water. Obtenido de <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#one>
- Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure Appl. Chem*, 73(7), 1163-1172. doi:10.1351/pac200173071163
- Wang, N., Zhu, L., Wang, D., Wang, M., Lin, Z. y Tang, H. (2010). Wang et al. (2010) highlighted that magnetism of iron nanoparticles made them viable agents for the removal of organic pollutants in polluted media. *Ultrasonics Sonochem*, 526-533. doi:10.1016/j.ultsonch.2009.11.001
- WHO, W. (2011). *Guidelines for drinking-water quality - 4th ed.* Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Zhang, Y., Mu, Y., Liang, P., Xu, Z., Liu, J., Zhang, H., . . . Gao, J. (2012). Atmospheric BTEX and carbonyls during summer seasons of 2008-2010 in Beijing. *Atmospheric Environment*, 186-191. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.030



- Modeling of CMUT capacitive ultrasonic transducers for thermal ablation for medical purposes

# Modelado de transductores ULTRASÓNICOS CAPACITIVOS

# CMUT

para ablaciones térmicas con fines médicos

Por:  Brian Michael Bouchan Durán · Manuel Bandala Sánchez · Gibran Etcheverry

## RESUMEN

En medicina existen casos en los cuales ciertas partes del cerebro deben ser eliminadas y se sabe que los procedimientos relacionados son complicados. Sin embargo, existe una técnica no invasiva de cirugía de cerebro por ablación HIFU (High Intensity Focused Ultrasound), que permite destruir tejido en lugar de removerlo mediante la focalización de ondas ultrasónicas en un punto y supervisar los cambios a través de una tomografía.

Este trabajo consiste en modelar, mediante elementos finitos, un transductor ultrasónico capacitivo micro-maquinado para aplicación médica a nivel intracraneal. Las especificaciones del sistema se obtienen mediante las ecuaciones de un modelo electro-mecánico que después son integradas en el software de análisis multifísico COMSOL® para su simulación, teniendo como meta operar a una frecuencia alrededor de 560 kHz y suministrar una presión mecánica que pueda servir de base para pensar en el diseño de un escalpelo ultrasónico en el futuro.

## PALABRAS CLAVE:

Escalpelo ultrasónico · CMUT · Análisis multifísico

**EXISTE UNA TÉCNICA NO INVASIVA DE CIRUGÍA DE CEREBRO POR ABLACIÓN HIFU, QUE PERMITE DESTRUIR TEJIDO EN LUGAR DE REMOVERLO MEDIANTE LA FOCALIZACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS EN UN PUNTO Y SUPERVISAR LOS CAMBIOS A TRAVÉS DE UNA TOMOGRAFÍA.**



## ◆ ABSTRACT

In medicine, there are cases in which certain parts of the brain must be eliminated and it is known that the related procedures are complicated. However, there is a noninvasive technique of ablation brain surgery HIFU (High Intensity Focused Ultrasound), which allows destroying tissue instead of removing it by focusing ultrasonic waves at a point, and monitoring these changes through a tomography.

This work consists of modeling a micro-machined capacitive ultrasonic transducer for medical applications at the intracranial level using finite elements. We obtain the system specifications by means of the equations of an electro-mechanical model that is then integrated in the COMSOL® multiphysics analysis software for its simulation. The main goal is to operate at a frequency around 560 kHz and supply a mechanical pressure of 2 MPa and if an in-phase arrangement is considered, it is possible to think about the design of an ultrasonic scalpel afterwards.

## ◆ KEYWORDS:

**Ultrasonic scalpel · CMUT · Multiphysical analysis**

## ◆ INTRODUCCIÓN

### ● Cirugías no invasivas

La técnica no invasiva más destacada se conoce como cirugía de cerebro por ablación.

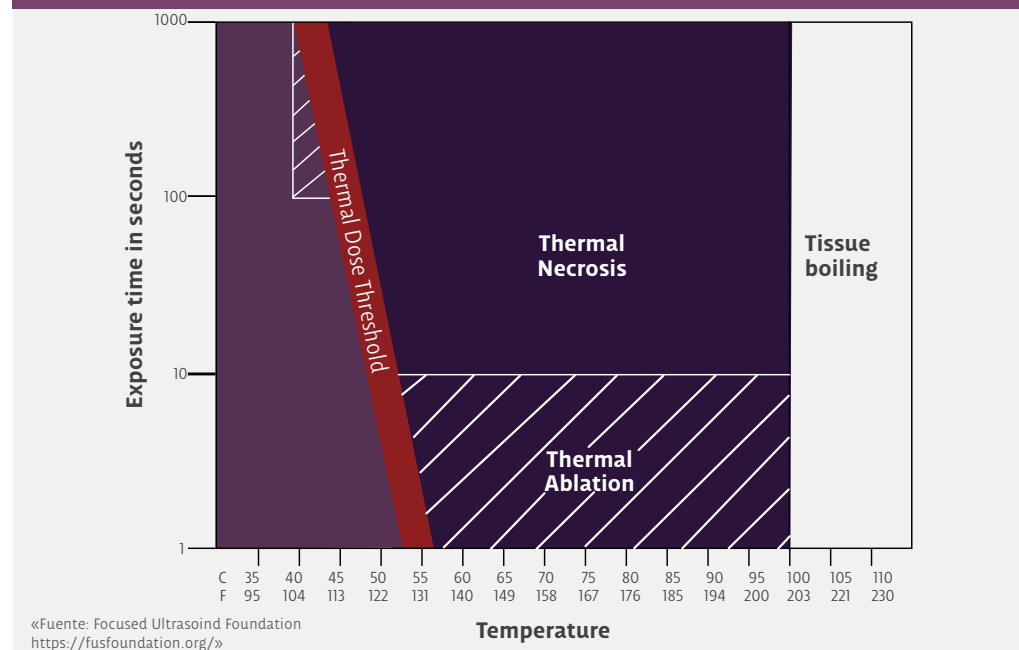
El término ablación proviene del latín *ablatus* que significa separar o retirar, y se utilizó para remover parte del cerebro de un animal y observar las consecuencias. Actualmente sólo se busca destruir tejido en lugar de removerlo a través de la ablación no invasiva térmica que tiene dos vertientes:

1. La ablación guiada por rayos láser y complementada por MRI (Magnetic Resonance Imaging) (Willie, Tung y Gross, 2015).
2. El HIFU (High Intensity Focused Ultrasound), también conocido como MRGFUS (Magnetic Resonance guided Focused Ultrasound) que focaliza ondas ultrasónicas en un punto y supervisa los cambios a través de una tomografía.

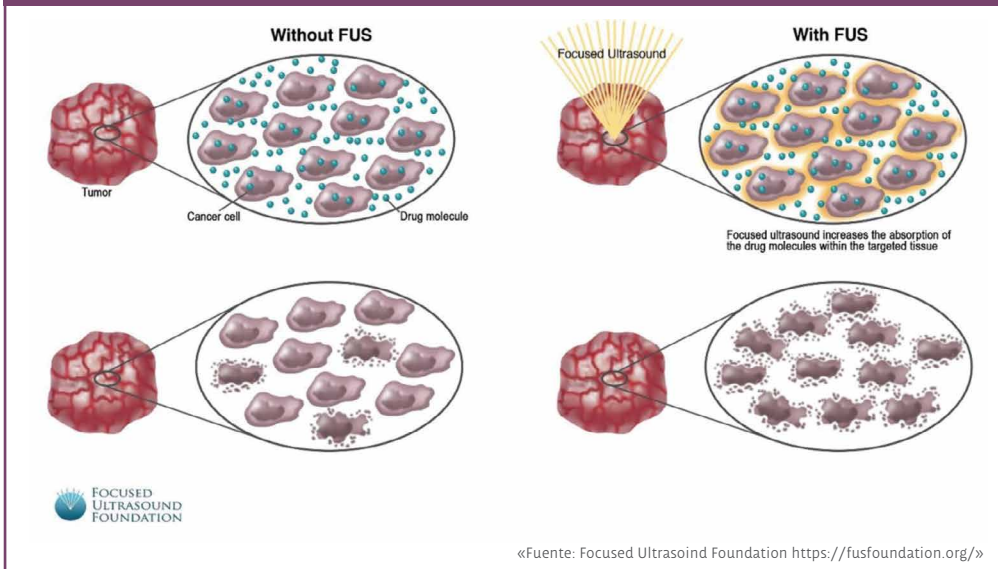
La HIFU emite ondas enfocadas en un solo punto a través de un transductor (arreglo en fase, lentes acústicos, elementos cóncavos, etc. [Zhou, 2011]); dichas ondas penetran por los tejidos y conforme se desplazan en el medio, pierden energía que se transforma en calor. Cuando se calienta el tejido, se pueden presentar cambios basados en la temperatura alcanzada y el tiempo de exposición (ver figura 1).

Las disposiciones técnicas sobre tratamientos intracraneales especifican que se utilizan rangos de frecuencias entre 500kHz (a nivel profundo) y 1 MHz, y hasta 4 MHz para otras aplicaciones. Con respecto a la presión acústica en el foco, se reportan 70 MPa pico en la compresión y 20 MPa en la rarefacción (Zhou, 2011).

**Figura 1. Efectos de la radiación ultrasónica sobre el tejido.**



**Figura 2. Medicación con ultrasonido focalizado-FUS**



También se ha reportado que el uso de ultrasonido focalizado en células cancerígenas favorece una mayor absorción medicamentosa (Wu, 2013) (ver figura 2).

● **El CMUT**

El CMUT significa, por sus siglas en inglés, transductor ultrasónico micro-maquinado capacitivo (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer); consiste en tener dos placas paralelas, una fija y la otra oscilante, a las que se aplica un voltaje (la otra está conectada a tierra) y por la ley de Coulomb se atraen. Al aplicar un voltaje alterno, las placas se desplazan acercándose y alejándose causando oscilaciones y generando ondas sónicas (ver figura 3).

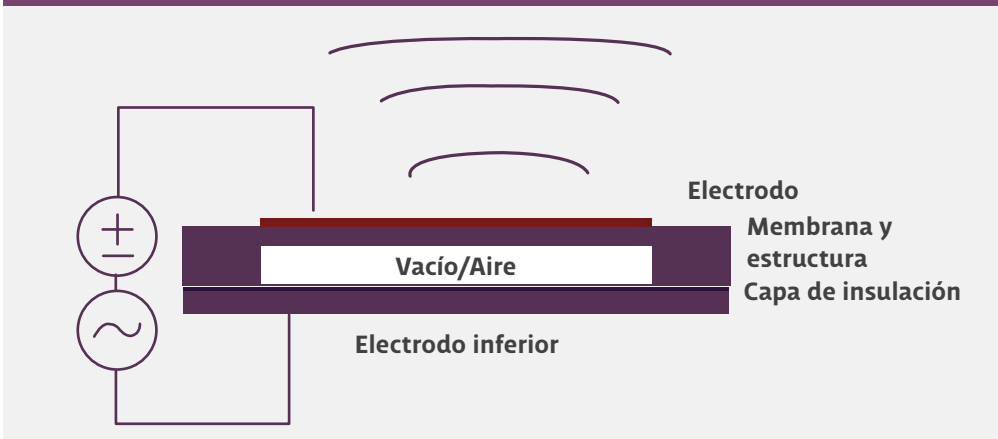
Los CMUT se han desarrollado principalmente para el área de inspección debido a su

bajo costo y su buena sensibilidad; eventualmente se han desarrollado como una nueva fuente de sistemas de ultrasonido médico para imagenología con mejor resolución en 2D y 3D (Khuri-Yakub y Oralkan, 2011).

◆ **METODOLOGÍA**

En este trabajo primero se realizó el estudio de parámetros de diseño del transductor y se revisó el estado del arte de las cirugías no invasivas. Después se realizó un estudio de principios físicos necesarios para la correcta operación del dispositivo CMUT, apoyados en ecuaciones básicas de mecánica, electrostática y acústica. Se realizó el modelado del sistema con la intención de simplificar su análisis y así reducirlo a un circuito equivalente. Una vez que se contó con el modelo, se buscaron los valores requie-

**Figura 3. CMUT, modo emisor.**



**EL CMUT SIGNIFICA TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO MICRO-MAQUINADO CAPACITIVO, CONSISTE EN TENER DOS PLACAS PARALELAS.**

ridos para poder crear el dispositivo con las especificaciones deseadas y a través del análisis de elementos finitos, se comprobó el cumplimiento de los objetivos específicos para un solo elemento.

#### ● Trabajo colaborativo

Para la realización de este trabajo se estableció un convenio marco CIDESI-UDLAP para llevar a cabo una estancia en el departamento de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) liderado por el Dr. Horacio Estrada Vázquez; el responsable del convenio fue el Dr. Manuel Bandala Sánchez por el CIDESI y el Dr. Gibran Etcheverry Doger por la UDLAP. El estudiante de doctorado Salatiel García Moreno fue el encargado de asesorar los fundamentos de este trabajo con la finalidad de apoyar su desarrollo en un ambiente dedicado al estudio y diseño de dispositivos MEMS, el manejo de herramientas computacionales, y el apoyo con documentación.

#### ● Modelado electro-mecánico del CMUT

El CMUT consiste en un modelo de placas paralelas que, al ser sometidas a una diferencia de potencial, generan un campo eléctrico que deforma la placa. Las ecuaciones y parámetros que se emplearon en este trabajo fueron obtenidas de diversas investigaciones (Wygant, Kupnik y Khuri-Yakub, 2008; Yamaner *et al.*, 2012).

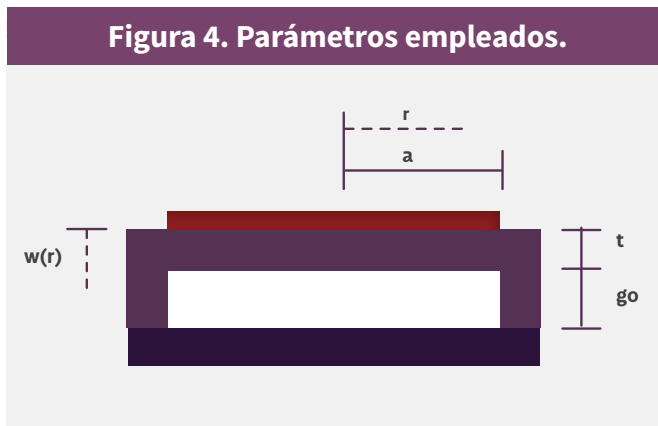


Figura 4. Parámetros empleados.

En la figura 4,  $r$  es un radio cualquiera a través de la placa superior,  $a$  es el radio total de la placa superior,  $t$  es el espesor de la placa,  $g_0$  es la separación entre las placas, y  $w(r)$  es la deformación puntual de la placa. Para poder conocer la forma en la cual se desplaza o deforma la placa, se emplearon modelos matemáticos de deformación de placas. La placa propuesta es de geometría circular y está sujeta en los extre-

mos, lo cual indica que no tendremos deformación en los extremos de ésta al ser deformada por una carga uniforme. Basándonos en estos parámetros, la deformación de la placa según la teoría de deformación de placas está dada por (Ventsel y Krauthammer, 2001; Timoshenko y Woinowsky-Krieger, 1959):

$$w_r = \frac{P_o(a)^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (1)$$

donde  $w_r$  es la deflexión a través de la placa  $a$  es el radio de la placa y 0 se refiere al centro de la placa;  $P_o$  es la presión que es ejercida y  $D$  es la rigidez flexural, la cual está definida como:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

siendo  $E$  el módulo de Young del material de la placa,  $t$  el espesor de la placa, y  $\nu$  el coeficiente de Poisson.

Para calcular la deformación máxima de la placa se emplea la ecuación (1) con el radio  $r=0$ :

$$w_{pk} = \frac{P_o(a)^4}{64D} \quad (3)$$

Y substituyendo (3) en (1), tenemos:

$$w_r = w_{pk} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (4)$$

La placa superior junto con el electrodo inferior en sentido eléctrico forman un capacitor, por lo que su fuerza electrostática está dada por (Griffiths, 1989):

$$C = \frac{\epsilon_o A}{g_o} \quad (5)$$

donde  $A$  es el área de la placa,  $g_o$  es la distancia entre las placas, y  $\epsilon_o = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$  es la constante de permitividad en el vacío.

Es importante mencionar que la teoría de capacitancia de placas paralelas simple no aplica en este caso, ya que la placa superior no tiene una forma regular, sino que tiene una forma dada por la ecuación (4). Por lo anterior, se necesita emplear una ecuación de capacitancia efectiva tomando en cuenta la deformación de la placa superior; de esta manera, se tomó en cuenta la fuerza capacitiva en cada zona de la placa integrando el área bajo la curva al substituir la ecuación (4) en la (5):

$$C_{placa} = \int_0^a \frac{\epsilon_0 A}{g_0 - w_{pk} (1 - \frac{r^2}{a^2})^2} dA \quad (6)$$

Considerando que la expresión en (4) cambia con respecto al radio de la placa cuando ésta se deforma, se aplica una razón de cambio entre área y radio tomando en cuenta que el área del círculo está dada por:

$$A_{circulo} = \pi r^2 \quad (7)$$

Por lo que el cambio de área se define como:

$$dA = 2\pi r dr \quad (8)$$

Y al substituir (8) en (6) tenemos:

$$C_{placa} = \int_0^a \frac{2\epsilon_0 \pi r}{g_0 - w_{pk} (1 - \frac{r^2}{a^2})^2} dr \quad (9)$$

Al resolver la integral:

$$C_{placa} = \frac{\epsilon_0 \pi a^2 \operatorname{atanh}(\sqrt{\frac{w_{pk}}{g_0}})}{\sqrt{w_{pk} g_0}} \quad (10)$$

La expresión (10) nos da la capacitancia cuando la placa se encuentra flexionada; la deformación promedio se estima entonces para asumir idealmente «una deformación uniforme en toda la placa» y está dada por:

$$W_{avg} = \frac{\int_0^a 2\pi r \frac{P_0 a^4}{64D} (1 - \frac{r^2}{a^2})^2}{\pi a^2} = \frac{\pi P_0 a^6}{3 \cdot 64 D} = \frac{P_0 a^4}{192 D} = \frac{w_{pk}}{3} \quad (11)$$

● **Vibración de la placa**

En la teoría de vibraciones hay principalmente dos tipos de movimientos vibratorios (Leissa, 1969):

1. **Vibración libre:** consiste en la oscilación del sistema bajo la acción de fuerzas inherentes al mismo sistema; el sistema vibra en una o varias de sus frecuencias naturales y ello depende de su geometría y material,
2. **Vibración forzada:** consiste en aplicar cargas mecánicas con cierta frecuencia obteniendo dos respuestas, la respuesta armónica cuando la fuerza aplicada es periódica y la respuesta transitoria cuando la fuerza externa no es periódica.

La frecuencia natural de nuestra placa sólida, circular con simetría radial y con sus límites de frontera establecidos en los bordes de la placa, se estima mediante la expresión (Timoshenko y Woinowsky-Krieger, 1959):

$$w = \frac{\lambda^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho t}} \quad (12)$$

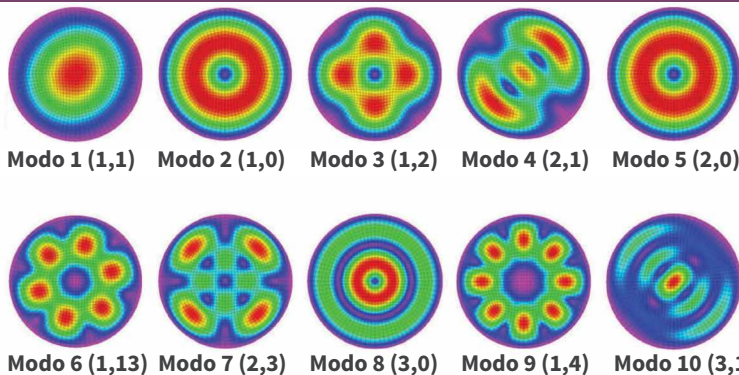
donde  $\lambda^2$  es un valor previamente estudiado y tabulado específicamente para placas circulares, y  $\rho$  es la densidad del material. Esta frecuencia natural o primera frecuencia es la que nos interesa ya que la geometría de su deformación nos permite obtener la máxima cantidad de desplazamiento al centro de la placa (Leissa, 1969) (ver figura 5, Modo 1).

● **Parámetros concentrados**

Para llevar a cabo un análisis, se realizó un circuito de parámetros concentrados que permite linealizar ecuaciones complejas. Este análisis consiste en un circuito con acoplamiento que almacena energía y que, idealmente, no presenta pérdidas y se basa principalmente en:

- Leyes electromagnéticas
- Principios de circuitos
- La ley de conservación de la energía

**Figura 5. Diez primeros modos naturales de una placa circular anclada a los límites (Senjanovic et al, 2014)**

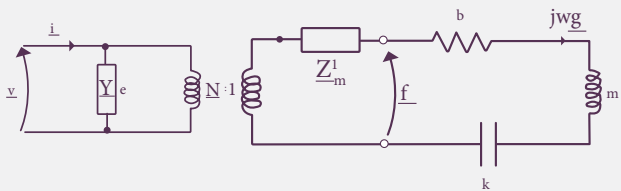


(imagen por University of Zagreb).

### ● Análisis de pequeña señal en MEMS

Una red de dos puertos nos permite analizar la relación entrada/salida de un sistema y que en el caso del CMUT, se basa en la entrada de voltaje y corriente alternos y en el movimiento de la placa como salida, expresado en la fuerza  $f$  que se traduce en la presión que ésta ejerce en el medio (aire, líquido) (ver figura 6) (Bouchan-Durán, 2018).

**Figura 6. Circuito equivalente del transductor con elementos externos mecánicos.**



Donde  $Y_e$  corresponde a la admitancia,  $Z_m^1$  a la impedancia,  $b$  es el coeficiente de fricción,  $k$  el coeficiente de resorte,  $m$  la masa de la placa, y tienen que ver respectivamente con la fase, frecuencia angular de vibración y separación entre las placas.

Es importante mencionar que para obtener la red de la figura 6, se tomaron en cuenta las siguientes equivalencias circuitales, ya que se trata de un sistema micro-mecatrónico:

**Figura 7. Equivalencias eléctricas con elementos mecánicos.**

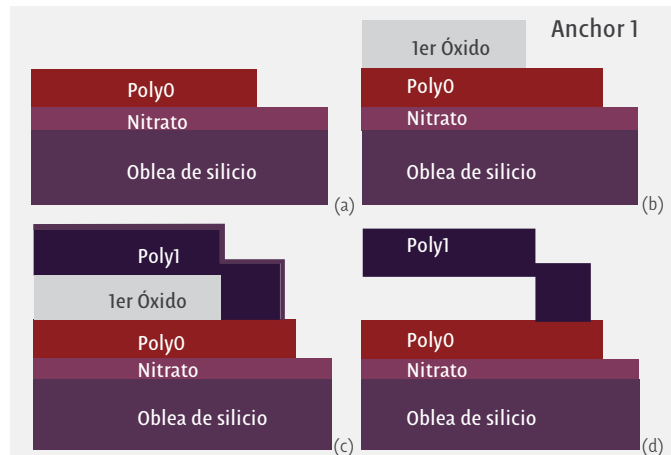
Símbolo	Eléctrico	Mecánico
	Generador de voltaje [V]	Generador de fuerza [F]
	Generador de corriente [I]	Generador de flujo [v]
	Resistencia [R]	Amortiguamiento [b]
	Capacitor [C]	Resorte [K]
	Inductor [L]	Masa [m]

Por cuestiones de espacio, las derivaciones son omitidas aquí, pero pueden ser encontradas en el documento de tesis de licenciatura «Modelo y diseño de transductores CMUT para ablaciones térmicas con fines médicos para la implementación de un escalpelo ultrasónico»<sup>1</sup> (Bouchan-Durán, 2018).

### ◆ DISEÑO Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

#### ● PolyMUMPS

PolyMUMPS es un proceso de micro-maquinado superficial de tres capas de poli-silicio, el cual se basa en pasos detallados de fabricación y para el CMUT planteado en este trabajo, el proceso consiste en una oblea de silicio de 150 mm de espesor seguida de una capa de nitrato de silicio depositado por LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) de un espesor de 600 nm, usado como aislante eléctrico. Sobre éste se deposita la primera capa de poli-silicio con 500 nm de espesor conocida como Poly0, esta capa se obtiene aplicando LPCVD y fotolitografía para fungir como el primer soporte mecánico (ver figura 8 [a]). El siguiente paso consiste en agregar el primer óxido, el cual es un compuesto de un poli-silicato cerámico mejor conocido como PSG (PhosphoSilicate Glass), considerado como capa de sacrificio, puesto que sólo sirve para dar soporte a las siguientes capas de poli-silicio. La siguiente capa consiste en crear un espacio para realizar los hoyos donde descansará la primera capa de poli-silicio, conocida como ANCHOR1, para entonces retirar el PSG y que exista contacto entre la siguiente capa y el nitrato o Poly0 (ver figura 8 [b]). El siguiente paso consiste en agregar la primera estructura mecánica del sistema hecha de poli-silicio, llamada Poly1, la cual consiste en una capa de  $2\mu\text{m}$  junto con una capa de silicio de 200nm como refuerzo (ver figura 8 [c]). Finalmente se generan hoyos de liberación que sirven para facilitar la extracción del óxido y liberar el mecanismo de esta capa de sacrificio (ver figura 8 [d]).



**Figura 8.** (a) Primera fase de manufactura, (b) primer óxido y creación de orificios para moldear Poly1, (c) estructura completa sin liberar óxido, (d) estructura liberada del óxido.

<sup>1</sup>[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/bouchan\\_duran\\_bm/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/bouchan_duran_bm/)

El proceso anterior se lleva a cabo mediante el uso de máscaras con fotoresist positiva (cuando la resina protege el área bajo la máscara) o fotoresist negativa (cuando la resina abraza el material debajo del área de la máscara). Observando desde un punto de vista superior, las máscaras definen el patrón o forma sobre la oblea, mientras que, desde un punto de vista lateral, el proceso de las capas es observable. En la figura 9 se muestran las máscaras correspondientes, el proceso, color y el tipo de resina empleada; estas especificaciones se tienen en la siguiente tabla:

Nombre de la máscara	Tipo de fotoresist	Color
Poly 0	Positivo	Rosa
ANCHORI	Negativo	Negro
Poly1	Positivo	Rojo
Hole1	Negativo	Verde

Tabla 1. Especificaciones de máscaras en PolyMUMPS para un CMUT.

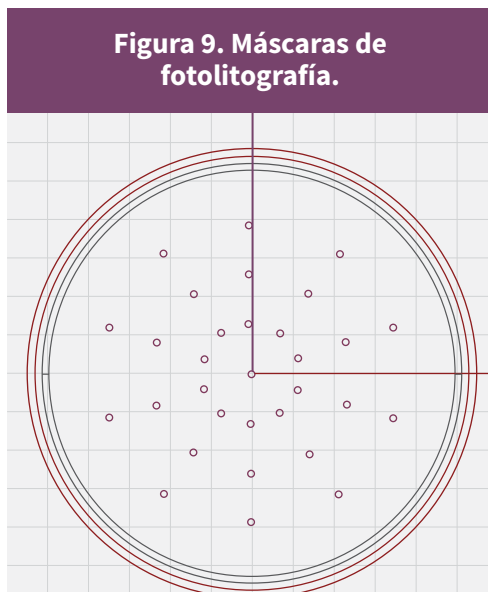


Figura 9. Máscaras de fotolitografía.

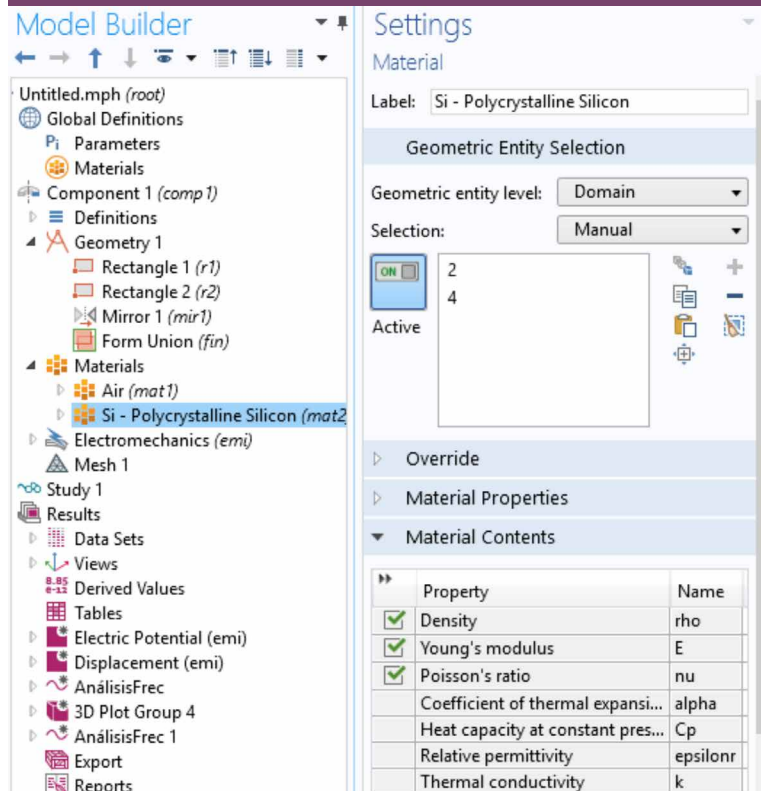
● **Análisis en COMSOL**

» **Geometría**

Los parámetros calculados mediante el uso de fórmulas para el CMUT propuesto en este trabajo se implementaron en un modelo 2D con un eje de rotación y la geometría básica de los cilindros o rectángulos rotados, con base igual al radio del dispositivo y una altura para el espesor de la placa y el espesor del aire.

» **Selección de materiales en COMSOL (figura 10)**

Figura 10. Selección de los materiales en COMSOL Multiphysics.



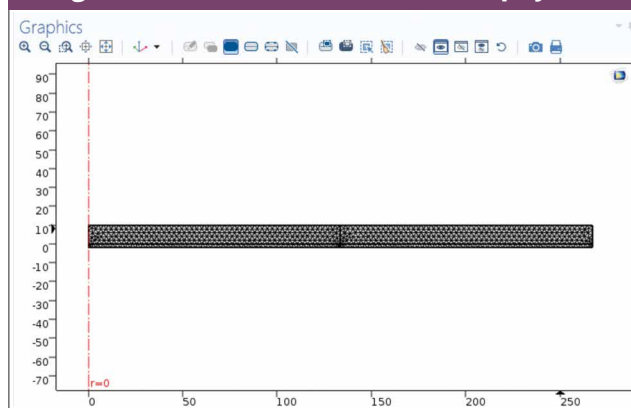
» **Condiciones físicas del sistema**

Las condiciones físicas del sistema limitan su movimiento al establecer los elementos estáticos y dinámicos, el factor de amortiguamiento, los voltajes y las frecuencias armónicas del sistema debido a su estructura y materiales.

» **Mallado**

El análisis de elementos finitos se basa principalmente en el mallado, el cual genera elementos, y éstos los elementos limitados (ver figura 11).

Figura 11. Mallado en COMSOL Multiphysics.



### » Análisis estacionario y de frecuencias

El análisis estacionario limita las condiciones de manera estática, como si se realizara una sola vez el proceso; mientras que el análisis de frecuencias se realiza mediante una señal sinusoidal con armónicos para saber en qué frecuencia el CMUT genera más energía.

### » Simulación

La placa vibratoria del CMUT desempeña el trabajo del electrodo superior, el cual se desplaza para generar ondas ultrasónicas. Las especificaciones básicas usadas para el diseño en este trabajo son:

- Vibración resonante del electrodo superior a **560 kHz**
- Presión acústica mínima por dispositivo de **200 kPa**

Las variables mecánicas, como el módulo de Young, el módulo de Poisson y la densidad volumétrica, son tomadas del polisilicio ya que sobre él se ejercen las cargas mecánicas. Finalmente, y para facilitar el análisis, suponemos que el electrodo superior tiene un ancho de 10  $\mu\text{m}$ . Entonces, el primer valor que se calcula es el del radio requerido para cumplir con la condición de frecuencia de resonancia dada en rad/s, por lo tanto, la ecuación (12) es despejada de tal manera para obtener:

$$\alpha = \sqrt{\frac{10.22}{w}} \sqrt{\frac{D}{\rho t}} \quad (13)$$

donde 10.22 es un valor obtenido de tablas sobre modos de vibración (Leissa, 1969),  $D$  es la

rigidez flexural y  $\rho$  es la densidad del polisilicio igual a  $2320 \text{ kg/m}^3$ . De esta manera, el radio obtenido aproximado es de  $267 \mu\text{m}$  y, resumiendo, los valores de diseño para el CMUT son:

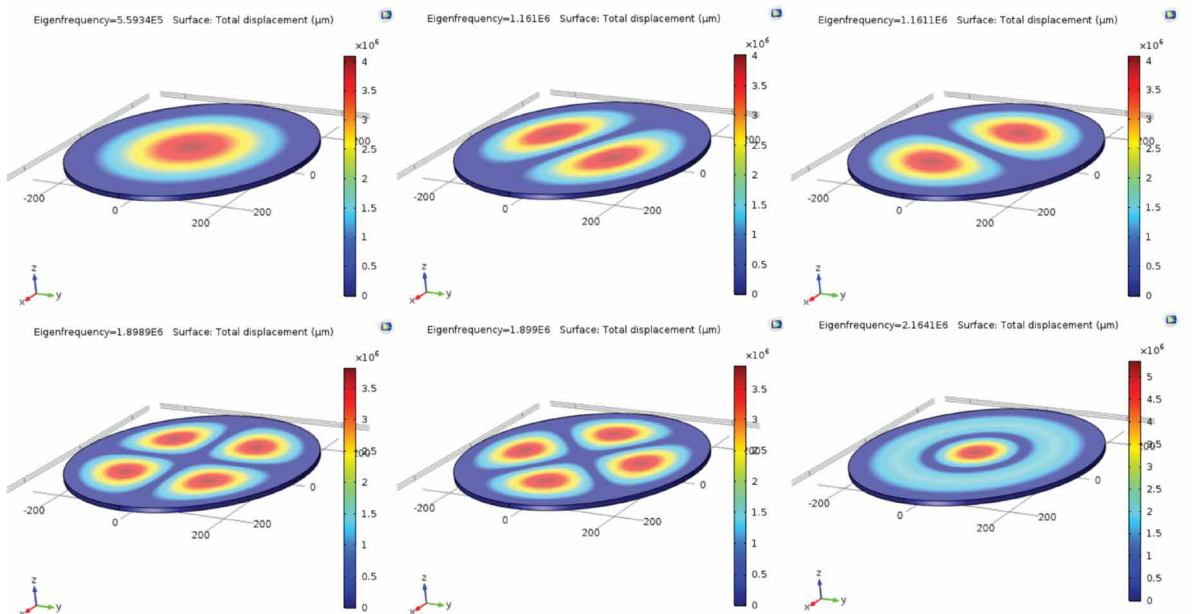
**Tabla 2. Tabla de especificaciones para un CMUT.**

Símbolo	Propiedad	Magnitud	Unidad
E	Módulo de Young	$190 \times 10^9$	Pa
$\nu$	Módulo de Poisson	0.22	-
$\rho$	Densidad del Polisilicio	2320	$\text{kg/m}^3$
$a_p$	Radio de la placa	$268.5 \times 10^{-6}$	m
$t_p$	Ancho de la placa	$10 \times 10^{-6}$	m
$g_0$	Distancia entre electrodos	$2^{-6}$	m

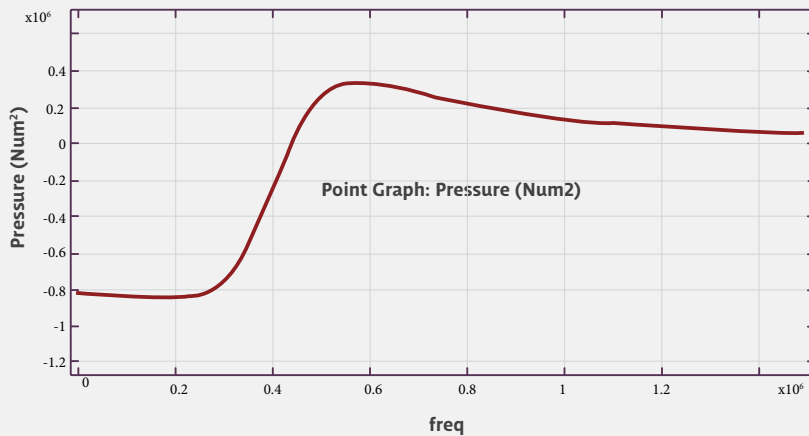
Empleando COMSOL se obtuvieron seis modos de vibración, donde el primero se dio a una frecuencia de 559.43 kHz (ver figura 12, esquina superior izquierda).

Para conocer la presión que el CMUT planteado en este trabajo puede ejercer, se llevó a cabo un análisis de respuesta en frecuencias, el cual consiste en aplicar una señal sinusoidal al sistema en conjunto con otras señales llamadas armónicos. Cuando se le aplican diversos armónicos se busca que el sistema entregue una mayor cantidad de energía mediante el mayor desplazamiento de la placa superior del CMUT. Como se observa en la figura 13, la mayor presión generada por el CMUT diseñado fue de 330 kPa a 560 kHz.

**Figura 12. Primeros seis modos de vibración de la placa.**



**Figura 13. Gráfica del análisis de presión con respecto a la frecuencia.**



## CONCLUSIONES

### ● Contribución

El diseño del CMUT en este trabajo permite pensar en un sistema que sea capaz de generar la energía suficiente para realizar una «ablación», considerando más adelante un arreglo de aproximadamente «diez CMUT en línea».

### ● Ventajas

En los escalpelos ultrasónicos actuales se emplean hasta 1024 elementos (Wu, 2013) y en nuestro caso sólo se requerirían de siete a diez elementos, dependiendo de la frecuencia de operación *versus* la presión máxima requerida.

### ● Desventajas

El análisis de un solo elemento podría requerir modificaciones geométricas al extenderlo para un arreglo de fase de CMUT.



### ● Brian Michael Bouchan Durán

Egresado de la licenciatura en Ingeniería Mecatrónica de la UDLAP en 2018 y se tituló con la tesis “Modelo y diseño de transductores CMUT

para ablaciones térmicas con fines médicos para la implementación de un escalpelo ultrasónico”, [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/bouchan\\_duran\\_bm/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/bouchan_duran_bm/). Actualmente cursa la maestría en Ciencia y Tecnología del Espacio en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica, y Electrónica (INAOE). [brian.bouchandn@hotmail.com](mailto:brian.bouchandn@hotmail.com)



### ● Manuel Bandala Sánchez

Durante varios años fue gerente del área de Micro-Electro-Mecanical Systems (MEMS) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en la ciudad de Querétaro y dirigió el proyecto sobre el multiplicador Maya, <https://centrosconacyt.mx/objeto/el-multiplificador-maya/>, actualmente es investigador asociado de la Universidad de Lancaster en el Reino Unido. [m.bandala@lancaster.ac.uk](mailto:m.bandala@lancaster.ac.uk)



### ● Gibran Etcheverry

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Profesor de tiempo completo del Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica (DCEM) en la Escuela de Ingeniería de la UDLAP y coordinador de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, <http://www.udlap.mx/ofertaacademica/profesores.aspx?cveCarrera=LMT&profesor=0019834&extracto=7>. [gibran.etccheverry@udlap.mx](mailto:gibran.etccheverry@udlap.mx)

## REFERENCIAS

- Bouchan-Durán, B. (2018). *Modelo y diseño de transductores CMUT para ablaciones térmicas con fines médicos para la implementación de un escalpelo ultrasónico* (tesis de licenciatura). Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/bouchan\\_duran\\_bm/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/bouchan_duran_bm/)
- Griffiths, D. J. (1989). *Introduction to Electrodynamics*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Khuri-Yakub, B. T. y Oralkan, O. (2011). Capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical imaging and therapy. *J. Micromech. Microeng.*, 21, 54004-54014.
- Leissa, A. W. (1969). Vibration of plates. Technical Report. *NASA-SP-160*, 362.
- Najar, M. H. M. (2008). *Design and analysis of capacitive micromachined ultrasound transducer* (tesis de maestría). The University of British Columbia.
- Senjanovic, I., Hadzic, N., Vladimir, N. y Cho, D. S. (2014). Natural vibrations of thick circular plate based on the modified Mindlin theory. *Arch. Mech.*, 66, 389-409.
- Timoshenko, S. y Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Ventsel, E. y Krauthammer, T. (2001). *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis and Applications*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- Willie, J. T., Tung, J. K. y Gross, R. E. (2015). Chapter 16 - MRI-Guided Stereotactic Laser Ablation, Image-Guided Neurosurgery, 375-403, Academic Press.
- Wu, F. (2013). High intensity focused ultrasound ablation and antitumor immune response. *J. Acoust. Soc. Am.*, 134(2), 1695-1701.
- Wygant, I. O., Kupnik, M. y Khuri-Yakub, B. T. (2016). CMUT design equations for optimizing noise figure and source pressure. *IEEE International Ultrason.*
- Wygant, I. O., Kupnik, M. y Khuri-Yakub, B. T. (2008). Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell. *Proc. of IEEE Ultrason.*, 2068-2071.
- Yamaner, F. Y. et al. (2012). High-power CMUTs: design and experimental verification. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 59(6), 1276-1284.
- Zhou, Y. F. (2011). High intensity focused ultrasound in clinical tumor ablation. *World Journal of Oncology*, 2(1), 8-27.

# Entorno

## POLÍTICA EDITORIAL

CONSULTE LA POLÍTICA EDITORIAL EN: [WWW.UDLAP.MX/ENTORNO](http://WWW.UDLAP.MX/ENTORNO)

### MISIÓN

Difundir el conocimiento, los avances científicos y tecnológicos, y la creación artística, a través de la publicación de artículos inéditos, que brinden aportaciones originales.

### CONTENIDO

Multidisciplinario, integrado con artículos derivados de una investigación, innovación o creación artística, desarrollada en universidades y centros de investigación con la participación de investigadores, profesores y/o estudiantes de instituciones mexicanas o extranjeras. Que difundan aportaciones o innovaciones científicas y tecnológicas originales, obras de creación artística o cultural. La orientación de los textos será de difusión del conocimiento y la creación artística.

Para los efectos de esta política editorial, se distingue la difusión como la publicación de contenidos originales que están dirigidos a lectores con formación profesional.

### COBERTURA TEMÁTICA

Interdisciplinaria, en cualquiera de los campos del conocimiento, la innovación o la creación artística que se cultivan en la Universidad de las Américas Puebla.

### TIPO DE CONTRIBUCIONES

#### · Artículo científico

Documento científico que trata y difunde los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual. La orientación de los textos será de difusión del conocimiento y éstos se someterán a revisión de pares.

#### · Artículo de creación

Documento que trata y difunde los resultados de una obra de creación artística o cultural. Será sometido a revisión de pares.

#### · Artículo de estado del arte

Documento que analiza a profundidad y difunde el conocimiento, en el estado del arte, de un problema, campo de investigación o área artística o literaria, de relevancia e interés general. Será sometido a revisión de pares.

### PROCESO DE ARBITRAJE

Las propuestas de contribuciones a la revista serán analizadas, revisadas y dictaminadas por el Editor en Jefe, con el visto bueno del Presidente del Consejo Editorial, quienes se apoyarán en los editores asociados y en dictámenes elaborados por árbitros designados para cada artículo.

El proceso de selección de artículos a publicar se realiza mediante un sistema de arbitraje "doble ciego", en el cual los árbitros desconocen el nombre de los autores de los artículos, y estos últimos desconocen el nombre de los árbitros. El proceso de arbitraje se rige por los criterios de veracidad, calidad ética y científica y no discriminación. La participación de los miembros del Consejo Editorial, del Comité Editorial y de los árbitros, se considera una contribución profesional, que se realiza de manera honorífica. El proceso de arbitraje de los artículos se puede consultar en <https://entorno.udlap.mx>

Todos los artículos se someterán a proceso de revisión por pares. Se publicarán trabajos de investigación, análisis e innovación científica, social, humanística o artística de especialistas y académicos mexicanos o de cualquier otra nacionalidad. Se podrán incluir coautores de diversas instituciones. Se aceptarán trabajos en español o inglés, y en todos los artículos se incluirá un resumen y palabras clave en español y en inglés.

### AUTORES

Los autores, por el simple hecho de someter su artículo para posible publicación en Entorno UDLAP, se comprometen a cumplir con el Código de Ética de la revista, disponible en el sitio web <https://entorno.udlap.mx>

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores.

La propuesta de un trabajo compromete a su autor a no someterlo simultáneamente a la consideración de otras publicaciones.

Los autores, cuyos artículos hayan sido aceptados, estarán de acuerdo en que éstos sean publicados en versión impresa y digital por la Universidad de las Américas Puebla, y que ésta puede hacer uso de sus contenidos con propósitos de difusión y promoción de la revista. Asimismo, aceptan que los artículos se publicarán bajo licencia de acceso abierto (Open Access) tipo "BY-NC-SA" Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Los artículos se someterán a revisión de estilo y diseño gráfico, por lo que los autores estarán atentos para resolver las dudas y propuestas que presenten los editores y la coordinación editorial. Cada autor aprobará las pruebas de imprenta de sus textos, como paso previo a su publicación.

#### · Recepción de trabajos

La recepción de artículos está abierta permanentemente, y una vez concluido el proceso de revisión por pares, se informará a los autores del resultado.

En caso de que éste sea aprobatorio, los editores procurarán publicar el artículo en el número más cercano posible de la revista.

Los artículos propuestos deberán enviarse siguiendo la Guía de Autores, que se puede consultar en el sitio web de la revista <https://entorno.udlap.mx>. Los interesados en publicar sus artículos deberán enviar el documento al Editor en Jefe de Entorno UDLAP, al correo electrónico: [revista.entornoudlap@udlap.mx](mailto:revista.entornoudlap@udlap.mx)

Todos los artículos propuestos deberán enviarse acompañados de una carta de presentación y originalidad, firmada por el autor de correspondencia, con el formato que se incluye en el portal de la revista en <http://www.udlap.mx/entorno/>

En el caso de textos con más de un autor, se indicará el nombre del "autor de correspondencia" que actuará en representación de todos los autores, y será quien mantenga la comunicación con el cuerpo editorial de la revista y coordinará el proceso de revisión con sus coautores y, en caso de ser aceptado para publicación, recabará la aprobación de la impresión por parte de todos los autores.

A juicio del Consejo Editorial, se analizará la pertinencia de proponer números especiales de la revista, cuyos contenidos obedecerán a temas específicos seleccionados. En este caso también los artículos se someterán al proceso de revisión por pares.

## PROCESO DE REVISIÓN

1. El autor, o autor de correspondencia, enviará el manuscrito del artículo propuesto al Editor en Jefe quien revisará el cumplimiento general de los criterios de la política editorial para someter un manuscrito a revisión, así como la carta de presentación y originalidad del texto. En caso de no cumplir los criterios editoriales, el Editor en Jefe lo informará a los autores para que, si así lo consideran conveniente, lo revisen y envíen de nuevo a proceso de revisión. En caso de cumplirse los criterios editoriales, el Editor en Jefe abrirá un expediente para el artículo y, con el apoyo del Editor Asociado del área de conocimiento correspondiente, designará dos árbitros de entre los miembros del Comité Editorial o invitará a otros profesores, investigadores o profesionales destacados a realizar el proceso de arbitraje. Los árbitros seleccionados podrán ser de la UDLAP o externos.

2. El artículo se enviará a los árbitros y se les fijará un plazo de una semana para declinar la invitación y de tres semanas para elaborar su dictamen. En caso de declinación, el Editor en Jefe, junto con el Editor Asociado, designará a otro árbitro.

3. El dictamen de los árbitros podrá emitirse en cualquiera de los siguientes sentidos:

- Acceptado
- Acceptado con cambios menores
- Acceptado sujeto a cambios mayores
- Rechazado

En todos los casos, el dictamen deberá ser argumentado adecuadamente. Por «acceptado sujeto a cambios mayores», se entiende que el manuscrito sólo será publicado si los autores cumplen con los cambios propuestos por los árbitros y será sujeto a una nueva revisión de parte del editor y/o los árbitros. Por «acceptado con cambios menores» se entiende que el manuscrito ha sido aceptado y se publicará tan pronto el autor o autores cumplan con los cambios solicitados, lo cual será revisado por el editor. El dictamen será inaplicable.

4. Una vez completado el ciclo de revisión y aprobado el texto, el Editor en Jefe enviará el manuscrito al Coordinador Editorial.

5. El Coordinador Editorial, con el apoyo del Editor Gráfico y del personal a su cargo, elaborarán el diseño editorial para la impresión final y lo enviarán al Editor en Jefe, Presidente del Consejo y al Secretario Ejecutivo para su revisión y aprobación. En caso necesario, se solicitará una nueva versión con correcciones a los autores. En esta etapa puede realizarse una revisión de estilo, que también será aprobada por los autores.

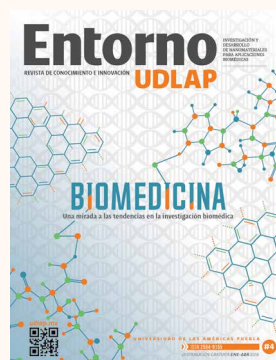
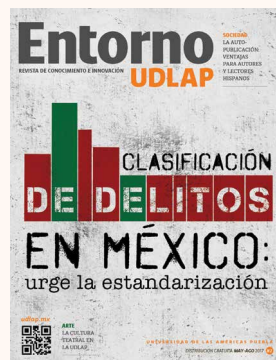
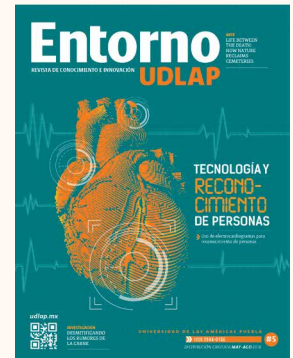
6. Una vez concluido el diseño editorial, el Editor en Jefe enviará a los autores la versión para impresión. Éstos, en su caso, harán las correcciones necesarias y firmarán una carta de autorización de la publicación.

## PERIODICIDAD

Edición cuatrimestral. La revista se editará en papel y en formato electrónico.

## ACCESO ABIERTO

La revista en formato electrónico tendrá acceso abierto en los sitios de internet de la UDLAP.





LLEGÓ TU MOMENTO,  
ELIGE  
UDLAP

# NUESTRAS LICENCIATURAS\*

## ESCUELA DE ARTES Y HUMANIDADES

- Animación Digital
- Arquitectura
- Arquitectura de Interiores
- Artes Plásticas
- Danza
- Diseño de Información Visual
- Historia del Arte y Curaduría
- Idiomas
- Literatura
- Música
- Teatro

## ESCUELA DE CIENCIAS SOCIALES

- Antropología
- Ciencia Política
- Comunicación y Producción de Medios
- Comunicación y Relaciones Públicas
- Derecho
- Pedagogía
- Psicología Clínica
- Psicología Organizacional
- Relaciones Internacionales
- Relaciones Multiculturales

## ESCUELA DE CIENCIAS

- Actuaría
- Biología
- Bioquímica Clínica
- Ciencia de Datos **NUEVA**
- Ciencias de la Nutrición
- Cirujano Dentista
- Enfermería
- Física
- Médico Cirujano
- Nanotecnología e Ingeniería Molecular
- Químico Farmacéutico Biólogo

## ESCUELA DE INGENIERÍA

- Ingeniería Ambiental
- Ingeniería Biomédica
- Ingeniería Civil
- Ingeniería en Energía
- Ingeniería en Industrias Alimentarias
- Ingeniería en Logística y Cadena de Suministros
- Ingeniería en Robótica y Telecomunicaciones
- Ingeniería en Sistemas Computacionales
- Ingeniería Industrial
- Ingeniería Mecánica
- Ingeniería Mecatrónica
- Ingeniería Química

## ESCUELA DE NEGOCIOS Y ECONOMÍA

- Administración de Empresas
- Administración de Hoteles y Restaurantes
- Administración de Negocios Internacionales
- Artes Culinarias
- Banca e Inversiones
- Economía
- Estrategias Financieras y Contaduría Pública
- Mercadotecnia

\*Todas nuestras licenciaturas cuentan con el Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios RVOE, puede consultarse en [www.udlap.mx](http://www.udlap.mx)





# UDLAP Consultores

CONSULTORÍA • **CURSOS** • DIPLOMADOS  
**PROGRAMAS ESPECIALES**

## EDUCACIÓN CONTINUA

Programas creados para contribuir con la formación, actualización y capacitación de nuestros clientes. Ofrecemos temas de vanguardia que mejoran la competitividad de las empresas y fomentan el desarrollo integral de los participantes. Impartidos por profesores con una amplia experiencia profesional y académica.

Los programas de educación continua se agrupan en las siguientes áreas:

- Artes y humanidades
- Ciencias sociales
- Contabilidad y finanzas
- Estrategias de marketing y negocios
- Habilidades Soft
- Ingeniería, tecnología y calidad
- Salud y bienestar

## SOLUCIONES EMPRESARIALES

Nos centramos en el diseño de programas y proyectos que respondan a las necesidades específicas de cada organización: el contenido, duración, lugar y forma de impartición se definen siempre en función de estas necesidades. Contamos con programas *on demand* que aportan un enfoque práctico y estratégico, siempre bajo la premisa de generar valor a la empresa.

Algunas de nuestras áreas de más demanda son:

- Coaching ejecutivo
- Capital humano y habilidades soft
- Alta dirección y estrategias empresariales
- Economía y finanzas
- Marketing, comunicación y relaciones públicas
- Ingeniería, tecnología y calidad
- Derecho y nueva legislación

## SOLUCIONES GUBERNAMENTALES

Programas enfocados en mejorar la administración pública en los ámbitos municipal, estatal y federal. El objetivo es elevar la calidad de los servicios que se ofrecen en estos sectores.

Nuestras áreas de especialización son:

- Recursos humanos
- Recursos financieros
- Planes y proyectos
- Programas de capacitación



## DOCTORADOS DE ALTA INVESTIGACIÓN

### Doctorado directo\* en:

- Biomedicina Molecular\*\* - RVOE SEP-SES/21/119/01/1640/2016
- Ciencia de Alimentos\*\* - RVOE SEP-SES/21/119/04/1172/2014
- Ciencias del Agua\*\* - RVOE SEP-SES/21/119/04/1171/2014
- Sistemas Inteligentes\*\* - RVOE SEP-SES/21/119/04/1173/2014

\*Puede iniciarse después de la licenciatura

\*\* Pertenece al Programa Nacional de Posgrados de Calidad de CONACYT

### Doctorado tradicional\* en:

- Creación y Teorías de la Cultura\*\* - RVOE SEP-SES/21/119/04/1641/2016

\*Puede iniciarse después de la maestría

\*\* Pertenecen al Programa Nacional de Posgrados de Calidad de CONACYT

**Los alumnos aceptados cuentan con beca del 100% de colegiatura y con una manutención mensual por toda la duración del programa**

### Informes:

Dirección de Investigación y Posgrado

informes.doctorados@udlap.mx • Tel.: 222 229 27 25